UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE MODERNO A SISTEMAS REGULADORES DE VELOCIDADE E TENSÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.

Uberlândia

2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE MODERNO A SISTEMAS REGULADORES DE VELOCIDADE E TENSÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.

CLÁUDIO HOMERO FERREIRA DA SILVA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG

2002

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

S586m Silva, Cláudio Homero Ferreira da, 1973-

Modelagem e aplicação de técnicas de controle moderno a sistemas reguladores de velocidade e tensão de máquinas síncronas de pequenas centrais hidrelétricas / Cláudio Homero Ferreira da Silva. - Uberlândia, 2002.

229f. : il.

Orientador: Humberto Molinar Henrique.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Controle preditivo - Teses. 2. Engenharia química - Teses. I. Henrique, Humberto Molinar. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.012-52 (043.3)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA,
EM 23/08/2002.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique
(Orientador - PPG-EQ/FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Luis Cláudio Oliveira Lopes
(PPG-EQ/FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Geraldo Caixeta Guimarães
(PPG-EE/FEELT/UFU)

Prof. Dr. Nestor Roqueiro
(PPG-EQ-UFSC)

Eng. MSc. Luiz Renato Gomes
(CEMIG)

DEDICATÓRIA

A minha família: **Homero**, **Iolanda** e **Cristiano** e a minha amada **Maria Teresinha**, que têm sido a grande razão e incentivo de meu aperfeiçoamento.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos: Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique (orientador) e ao Eng. MSc. Luiz Renato Gomes (co-orientador) pelas diretrizes seguras e permanente incentivo, contribuindo de forma decisiva para a construção sólida de meu conhecimento e de minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Luis Cláudio Oliveira Lopes, a Profª. Dra. Valéria Viana Murata e ao Prof. MSc. Alvimar Ferreira do Nascimento, bem como aos demais professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, pelo exemplo que são, transferindo para seus alunos muito mais do que conhecimento puramente técnico; formando não somente engenheiros como também pessoas éticas e conscientes, que certamente buscarão a construção de um mundo melhor.

Aos meus amigos, pelo estímulo e incansável compreensão.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

EPÍGRAFE

"... DEUS ESCOLHE O MELHOR DOS MUNDOS DENTRE TODOS AQUELES QUE SE APRESENTAM COMO POSSÍVEIS...".

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ
(1646-1716)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA i
AGRADECIMENTOS ii
EPÍGRAFE iii
LISTA DE FIGURAS ix
LISTA DE TABELAS xvi
LISTA DE SÍMBOLOS xviii
RESUMO xxvi
ABSTRACT xxvii

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO 2
   1.1 Breve Histórico 2
   1.2 Importância 4
   1.3 Justificativas 5
   1.4 Delimitações do Assunto e Formulação de Hipóteses 6
   1.5 Objetivos da Pesquisa 7

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9
   2.1 Introdução 9
   2.2 Importância dos sistemas de controle 10
   2.3 Fundamentos, Evolução Histórica e Perspectivas. 10
   2.4 Teoria de Espaço de Estados 15
   2.4.1 Controle de sistemas por colocação de pólos. 17
   2.4.2 Controle Ótimo 18
   2.4.3 Observadores de Estado 19
   2.5 Solução Completa da Equação de Estado 21
   2.6 Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) 22
   2.6.1 Histórico 22
   2.6.2 Formulações Clássicas 25
      DMC 25
      QDMC 27
   2.6.3 Robustez com o controlador MPC 27
   2.7 Considerações Finais 28

CAPÍTULO 3

3. PROCESSO: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 30
3.1 Introdução 30
3.2 Panorama Histórico da Energia Elétrica no Brasil 31
3.3 Sistemas Elétricos de Potência 33
3.4 Modelagem do Processo 40
3.5 Resposta do Sistema com os Reguladores Atuais. 46
3.6 Avaliação dos Parâmetros do Modelo 48
3.7 Alterações na Planta e Modelo em Espaço de Estados 49
3.7.1 Alterações na Planta 49
3.7.2 Modelo em Espaço de Estados 51
3.7.3 Controlabilidade 56
3.7.4 Observabilidade 58
3.7.5 Estabilidade 58
3.7.6 Observadores de Estado 59
3.7.7 Limitações do Processo. 60
3.8 Considerações Finais 61

CAPÍTULO 4

4. PROJETO DE CONTROLADOR POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS 63
4.1 Introdução 63
4.2 Formulação 64
4.2.1 Problema Regulador 64
4.2.2 Problema Servo 64
4.2.3 Observadores de Estado 65
Observador de Ordem Plena: problema regulador 65
Observador de Ordem Plena: problema servo 66
Observador de Ordem Mínima: 68
Observador de Ordem Mínima: problema regulador 68
Observador de Ordem Mínima: problema servo 70
4.2.4 Entrada de carga no sistema ou perturbação não medida 72
4.2.5 Questão de modelagem 73
4.3 O Controlador e os Observadores 74
4.4 Modelagem em espaço de estados com os controladores atuais 75
4.5 Resultados 77
4.5.1 Problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita: 78
4.5.2 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita: 79
4.5.3 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo: 83
4.5.4 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo: 84
4.6 Considerações Finais 87

CAPÍTULO 5

5. PROJETO DE CONTROLADOR POR CONTROLE ÓTIMO 89
5.1 Introdução 89
5.2 Formulação 90
5.3 O Controlador e os Observadores 90
5.4 Resultados 91
5.4.1 Problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita: 92
5.4.2 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita: 93
5.4.3 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo: 97
5.4.4 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo: 98
5.5 Considerações Finais 101

CAPÍTULO 6

6. PROJETO DE CONTROLADOR USANDO TÉCNICAS DE CONTROLE PREDITIVO 103
6.1 Introdução 103
6.2 Formulação 105
6.2.1 Discretização 105
6.2.2 MPC Com Restrições 106
6.2.3 O problema de Otimização 111
6.2.4 MPC Sem Restrição 113
6.3 Resultados 113
6.3.1 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita e MPC sem restrições: 116
6.3.2 Problema regulador, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC sem restrições: 118
6.3.3 Problema servo, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrições: 119
6.3.4 Problema regulador, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrições: 120
6.3.5 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrições: 121
6.3.6 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrições: 122
6.4 Comparação entre os projetos realizados 123
6.5 Considerações Finais 131

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES 133
Proposições Futuras 138

ANEXOS

ANEXO A – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ESTADO 140
ANEXO B – TABELAS DO CAPÍTULO 3 141
ANEXO C – LISTA E GRÁFICOS DO CAPÍTULO 4 144
C.1 – Lista de Simulações 144
C.2.1 Problema servo,com observador pleno e com modelagem perfeita: 149
C.2.3 Problema regulador,com observador mínimo e com modelagem perfeita: 152
C.2.4 Problema servo,com observador mínimo e com modelagem perfeita: 153
C.2.5 Problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo: 156
C.2.6 Problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo: 157
C.2.7 Problema regulador, com observador mínimo e com desvio planta/modelo: 159
C.2.8 Problema servo, com observador mínimo e com desvio planta/modelo: 160
ANEXO D – LISTA E GRÁFICOS DO CAPÍTULO 5 164
D.1 – Lista de Simulações 164
D.2.1 Problema servo,com observador pleno e com modelagem perfeita: 168
D.2.3 Problema regulador, com observador mínimo e com modelagem perfeita: 171
D.2.4 Problema servo, com observador mínimo e com modelagem perfeita: 172
D.2.5 Problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo: 174
D.2.6 Problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo: 176
D.2.7 Problema regulador, com observador mínimo e com desvio planta/modelo: 178
D.2.8 Problema servo, com observador mínimo e com desvio planta/modelo: 179
ANEXO E – GRÁFICOS DO CAPÍTULO 6 183
E.1 – Gráficos 183
E.1.1 Problema regulador,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC sem restrição: 183
E.1.2 Problema servo,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC sem restrição: 184
E.1.3 Problema servo,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrição: 185
E.1.4 Problema regulador,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrição: 186
E.1.5 Problema servo, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição: 187
E.1.6 Problema regulador, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição: 189
E.1.7 Problema regulador, com observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição: 190
E.1.8 Problema servo, com observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição: 191

E.1.9 Problema servo, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrição: 192
E.1.10 Problema regulador, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrição: 193

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 196

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema de controle linear e contínuo no tempo representado em espaço de estados. 16
Figura 2.2 – Trajetórias do plano de estados: a- Estabilidade de Lyapunov; b- Estabilidade assintótica; c- Instabilidade 17
Figura 2.3 – Sistema de controle em malha fechada com **u** = -**Kx.** 18
Figura 2.4 – Diagrama de blocos do sistema com observador de estado de ordem plena. 20
Figura 2.5: Horizonte de ações, centro da teoria de MPC. 24

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Diagrama de carga verificado em um período para um bloco de geração- Tempo (h) x Potência (MW). 34
Figura 3.2 – Curva de Capabilidade para um conjunto gerador síncrono. 35
Figura 3.3 – Características da ação da regulação secundária da turbina. 37
Figura 3.4 – Circuito para máquina contra barra infinita. 40
Figura 3.5: Diagrama de blocos com as funções de transferência do processo original, com a presença de reguladores de velocidade e tensão 42
Figura 3.6: Resposta do sistema ao degrau de 0,00045 pu aplicado na referência do Regulador de Velocidade referente à variação de 1% na potência mecânica. 47
Figura 3.7 – Resposta do sistema ao degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão referente à variação de 0.01 pu na tensão VT. 47
Figura 3.8 – Resposta do sistema ao degrau de 0,01 pu na carga do sistema. 48
Figura 3.9 –Foto - Regulador de Velocidade atual e detalhe da válvula piloto. 50
Figura 3.10 – Foto - Regulador de tensão e excitatriz atualmente em funcionamento. 50
Figura 3.11 – Esquemático de alterações propostas. 51
Figura 3.12 –Diagrama de blocos de funções de transferência considerando as alterações, constituindo a nova malha aberta para construção do modelo em espaço de estados 51
Figura 3.13 – Degrau de 0,00045 pu em “Step”, da Figura 3.12, considerando a presença de bp. 53
Figura 3.14 –Degrau de 0,01 pu em “Step1” da Figura 3.12, considerando a presença de bp. 53
Figura 3.15- Degrau de 0,01 pu em “Step2” da Figura 3.12, considerando a presença de bp. 53
Figura 3.16: Degrau de 0,00045 pu em “Step” desconsiderando a realimentação bp. 54
Figura 3.17: Degrau de 0,01 pu em “Step1” desconsiderando a realimentação bp. 54
Figura 3.18: Degrau de 0,01 pu em “Step2” desconsiderando a realimentação bp. 55
Figura 3.19: Degrau de 0,01 pu em “Step2” considerando a realimentação bp. 55
Figura 3.20: Sistema original submetido a uma variação de 0,01 em Step. 56

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Configuração do sistema para o problema servo. 65
Figura 4.2: Sistema em problema servo com observador de ordem plena 67
Figura 4.3: configuração do sistema considerando um observador de ordem mínima ou reduzida. 70

Figura 4.4: Configuração do sistema considerando um observador de ordem mínima ou reduzida em um problema servo. 71
Figura 4.5: Configuração do sistema sujeito a uma perturbação não medida........ 73
Figura 4.6: Modelagem perfeita x desvio planta/modelo. 74
Figura 4.7 – Trajetória das estados (**x**) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos........ 78
Figura 4.8 – Curvas das saídas (a) e dos sinais de controle (b) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. 79
Figura 4.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 80
Figura 4.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT........ 81
Figura 4.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu. 82
Figura 4.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem plena, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. 83
Figura 4.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 84
Figura 4.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. . Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 85
Figura 4.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu. 86

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo........ 92
Figura 5.2 – Trajetória das estados (**x**) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. 93
Figura 5.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ........ 94
Figura 5.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 95
Figura 5.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu........ 96

Figura 5.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo........................97
Figura 5.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ...........98
Figura 5.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 99
Figura 5.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu..........100

CAPÍTULO 6

Figura 6.1: Diagrama de blocos da planta e do sistema de controle...................................107
Figura 6.2 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 116
Figura 6.3 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 117
Figura 6.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Degraus de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle...118
Figura 6.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 119
Figura 6.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle....................120
Figura 6.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle....................121
Figura 6.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 122
Figura 6.9: Respostas do sistema a degraus nas referências (Step e Step 1) e com carga (Step2), como mostra a Figura 3.5, considerando os reguladores originais..................123
Figura 6.10: Comportamento do sistema com controlador por colocação de pólos. Problemas: servo e entrada de carga. 124
Figura 6.11: Comportamento do sistema com controlador por controle ótimo. Problema servo e entrada de carga...124

Figura 6.12: Comportamento do sistema com controlador por MPC sem restrição. Problema servo e entrada de carga. 125
Figura 6.13: Comportamento do sistema com controlador por MPC com restrição. Problema servo e entrada de carga. 126
Figura 6.14: Variáveis manipuladas para controle ótimo (CO), MPC (MPCs e MPCc) e colocação de pólos (CP) para entrada de carga no sistema. 126
Figura 6.15: Saídas do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade 127
Figura 6.16: Sinais de controle do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade. 127
Figura 6.17: Saídas do sistema com os controladores para o problema de entrada de carga ou perturbação não-medida no sistema. 128
Figura 6.18: Sinais de controle do sistema com os controladores atuando na entrada de carga. 129
Figura 6.19: Saídas do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade 129
Figura 6.20: Sinais de controle do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade. 130
Figura 6.21: Saídas do sistema com os controladores para entrada de carga no sistema 130
Figura 6.22: Sinais de controle para controladores atuando na entrada de carga no sistema. 131

ANEXOS

Figura C.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. 148
Figura C.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 149
Figura C.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 150
Figura C.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0.01 pu. 151
Figura C.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. 152
Figura C.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 153
Figura C.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT 154

Figura C.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu. 155
Figura C.9 – Curvas das saídas (**y**) e sinais de controle (**u**) para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. 156
Figura C.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 157
Figura C.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT 158
Figura C.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu 159
Figura C.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. 160
Figura C.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 161
Figura C.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT 162
Figura C.16 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu. 163
Figura D.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. 167
Figura D.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 168
Figura D.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 169
Figura D.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu. 170
Figura D.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. 171
Figura D.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta

ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 172
Figura D.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 173
Figura D.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu. 174
Figura D.9 – Curvas das saídas (**y**) e sinais de controle para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. 175
Figura D.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ......... 176
Figura D.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 177
Figura D.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu. 178
Figura D.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. 179
Figura D.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 180
Figura D.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 181
Figura D.16 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu. 182
Figura E.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle. 183
Figura E.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 184
Figura E.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 185

Figura E.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC com restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle. 186
Figura E.5 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ. 187
Figura E.6 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 188
Figura E.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle. 189
Figura E.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle. 190
Figura E.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 191
Figura E.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT. 192
Figura E.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle. 193

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1: CLASSIFICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SEGUNDO SEU USO NA INDÚSTRIA. 10

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1: BASE DE VALORES ADOTADA. 41
TABELA 3.2: VALORES NOMINAIS DOS PARÂMETROS. 46

CAPÍTULO 4

TABELA 4.1: SAÍDAS DO SISTEMA PARA PROBLEMA REGULADOR COM $\mathbf{r} = [-1\ -2\ -3\ -4\ -5\ -6]$ E VARIAÇÃO EM 1% EM CADA ESTADO 77
TABELA 4.2: AUTOVALORES SELECIONADOS DOS CONTROLADORES PROJETADOS POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS. 78

CAPÍTULO 5

TABELA 5.1: MATRIZES DE PENALIZAÇÃO SELECIONADA NO PROJETO DE CONTROLADORES POR CONTROLE ÓTIMO. 91

CAPÍTULO 6

TABELA 6.1: RESTRIÇÕES DAS ENTRADAS (**u**) E SAÍDAS (**y**) PARA A FORMULAÇÃO DO MPC. 114
TABELA 6.2: VALORES DOS PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO CONTROLADOR MPC. 115

ANEXOS

TABELA B.1: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,00045 PU EM STEP. 141
TABELA B.2: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,01 PU EM STEP1. 142

TABELA B.3: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,01 PU EM STEP2. 142
TABELA B.4: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES 143
TABELA B.5: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES. 143
TABELA B.6: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES. 143
TABELA C.1: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS. 144
TABELA D.1: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR CONTROLE ÓTIMO. 165
TABELA D.2: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR CONTROLE ÓTIMO. 166

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia

! – Fatorial.

∂ - Derivada Parcial.

∞ - Infinito.

∫ - Integral.

$\Delta\mathbf{u}(k)$ – Movimentos das variáveis manipuladas.

Δx_n – Estado que ocorreu variação.

1a, 1b,2a, 2b – Casos de estudo de desvio planta/modelo

A – Matriz da planta.

a(k) – Variável auxiliar definida para resolução da otimização QP do MPC.

a,b,c – Trajetória dos estados no plano de fases.

$\mathbf{A}_{aa}$, $\mathbf{A}_{ab}$, $\mathbf{A}_{ba}$, $\mathbf{A}_{bb}$ – Matrizes particionada considerando estados medidos e não medidos.

Ad – Matriz da planta usada para o estudo do problema de desvio planta modelo.

$\mathbf{A}_e$ – Nova matriz **A** após a realimentação para problema regulador com observador pleno.

$\mathbf{A}_e$ – Nova matriz **A** após realimentação para o problema regulador com observador pleno.

$\mathbf{a}_i$ – Matriz dos coeficientes da resposta do sistema ao degrau unitário.

$\mathbf{A}_{i,j}$ – Matriz dinâmica.

$\mathbf{A}_{MPC}(k)$ – Variável auxiliar definida para resolução da otimização QP do MPC.

$\mathbf{A}_N$ – Nova matriz **A**.

$\mathbf{A}_{om}$ – Nova matriz **A** após realimentação para o problema regulador com observador mínimo.

$\mathbf{A}_s$ – Nova matriz **A** após realimentação para o problema servo sem observador.

A^{Sat}, B^{Sat} – Parâmetros estimados na curva de saturação.

$\mathbf{A}_{SO}$ – Nova matriz **A** após realimentação para o problema servo com observador pleno.

$\mathbf{A}_{SOM}$ – Nova matriz **A** após realimentação para o problema servo com observador mínimo.

AT –Atende aos requisitos do processo.

B – Matriz de entradas.

b(k) – Variável auxiliar definida para resolução da otimização QP do MPC.

$\mathbf{B}_a$, $\mathbf{B}_b$ – Matrizes particionada considerando estados medidos e não medidos.

Bd – Matriz de entradas usada para o estudo do problema de desvio planta modelo.

$\mathbf{B}_{MPC}(k)$ – Variável auxiliar definida para resolução da otimização QP do MPC.

bp – Estatismo permanente.

$\mathbf{B}_s$ – Nova matriz **B** após realimentação para o problema servo sem observador.

$\mathbf{B}_{SO}$ – Nova matriz **B** após realimentação para o problema servo com observador pleno.

$\mathbf{B}_{SOM}$ – Nova matriz **B** após realimentação para o problema servo com observador mínimo.

bt – Estatismo transitório.

c – Constante.

C – Matriz de saídas.

Cd – Matriz de saídas usada para o estudo do problema de desvio planta modelo.

D – Fator de amortecimento de carga.

D – Matriz de transmissão direta.

d(k) – Erro corrente do estimador.

Dd – Matriz de transmissão direta usada para o estudo do problema de desvio planta modelo.

$\mathbf{d}_{DMC}(k)$ – Fatores não medidos.

dt – Derivada.

DT – Problemas de dinâmica.

$\mathbf{D}_v$ – Partição de **D** referente à **v**.

$\mathbf{D}_z$ – Partição de **D** referente à **z**.

E – Tensão da máquina síncrona.

$e^{(...)}$ – Exponenecial.

E'_q- Força eletromotriz.

$E'q_0$ – FEM inicial.

$\mathbf{e}_{DMC}(k+1)$ – Vetor de projeção dos desvios do valor desejado das saídas.

$\mathbf{e}_M$ – Vetor composto por x e $\tilde{\mathbf{x}}$.

$\mathbf{e}_{RP}$ – Vetor composto pela diferença de x e $\tilde{\mathbf{x}}$ para o problema regulador com observador de ordem plena.

$\mathbf{e}_s$ – Vetor composto pelos estados e ξ para o problema servo sem observador.

$\mathbf{e}_{SO}$ – Vetor composto pelos estados, $\tilde{\mathbf{x}}$ e ξ para o problema servo com observador pleno.

$\mathbf{e}_{SOM}$ – Vetor composto por x, $\mathbf{e}_M$ e ξ.

f – Freqüência.

g – Vetor gradiente.

H - Constante de inércia do conjunto girante.

h – Instantes no futuro.

H – Matriz de resposta pulso.

$\mathbf{H_H}$ – Hamiltoniano.

$\mathbf{H}_i$ – Matriz de resposta pulso.

$\mathbf{H}_{iv}$ – Matriz de resposta pulso.

$\mathbf{H}_s$ – Matriz Hessiana.

I – Matriz identidade.

i, j – Índice.

I1,I2 – Correntes.

$\mathbf{I}_2$ – Matriz identidade de ordem 2.

$\mathbf{I}_6$ – Matriz identidade de ordem 6.

IS- Instável.

J- Índice de desempenho.

K – Matriz de realimentação.

k – Tempo de amostragem.

K_1 – Coeficiente de torque sincronizante.

K_2 – Variação da potência com pequeno δ e E'_q.

K_3 – Fator de impedância de carga.

K_4 – Efeito desmagnetizante devido a carga.

K_5 – Variação da tensão terminal com relação a um pequeno desvio de δ quando o fluxo enlaçado permanece constante.

K_6 – Variação da tensão terminal com relação a uma pequena variação no fluxo enlaçado quando δ permanece constante.

K_A - Ganho do regulador de tensão.

K_{AI} – Ganho integral do regulador de tensão.

K_{AP} – Ganho proporcional do regulador de tensão.

K_E – Ganho da excitatriz.

$\mathbf{K_e}$ – Matriz de ganho do observador de estado.

$\mathbf{k}_i$ – Matriz de ganho integral para problema servo.

$\mathbf{K_{MPC}}$ – Constante de ganho do estimador.

$\mathbf{K}_x$, $\mathbf{K}_{xr}$, $\mathbf{K}_r$, $\mathbf{K}_y$ e $\mathbf{K}_v$, $\mathbf{L}_{MPC}$ e $\mathbf{K}_u$ – Matrizes auxiliares definidas para resolução do MPC sem restrições.

L – Carga.

L(**x,u**) – Função quadrática.

m – Dimensão de **m**.

M – Horizonte de controle.

m(k) – variável manipulada.

MA – Malha aberta.

MA$_m$ – Malha aberta para sistema com observador de estado mínimo.

ME – Esforço excessiva da variável manipulada.

MF – Malha fechada.

m_v – Dimensão de **v**.

m_z – Dimensão de **z**.

N – Diferença entre os movimentos calculados e o intervalo para o novo estado estacionário.

ny – Dimensão de **y**.

OM – Observador mínimo.

OP – Observador pleno.

P – Horizonte de predição.

P – Matriz da ordem de x.

P=M – Modelagem perfeita.

PA – Potência acelerante.

PCU – Potência absorvida da carga.

PE – Potência elétrica.

PEM – Potência elétrica transferida pela máquina.

PET – Potência elétrica ativa transferida.

PM – Potência mecânica.

Pot – Potência.

Pot_0 – Potência inicial.

Pot_1 – Potência no instante 1.

PU, pu – por unidade.

Q – Matriz de ponderação positiva definida ou positiva semi-definida.

Q$_{MPC}$ – Parâmetro de ajuste do MPC, não negativo.

Qom – Matriz de penalizaçãoQ para o observador mínimo.

Qop – Matriz de penalização Q para o observador pleno.

Qs, Rs – Matriz de penalização Q para o problema servo.

R - Matriz de ponderação positiva definida.

r – número de variáveis manipuladas.

R – Regulador.

r – Vetor de *setpoints*.

$\mathbf{R}_{\Delta}$ - Parâmetro usado no cálculo de $\Delta\boldsymbol{\mu}$(k).

$\mathbf{R}_{\mathbf{MPC}}$ - Parâmetro de ajuste do MPC, não negativo.

rom – Vetor de autovalores para observador de ordem mínima.

rop – Vetor de autovalores para observador de ordem plena.

rs – Vetor de autovalores para problema servo.

rso – Vetor de autovalores para problema regulador.

s – número de variáveis controláveis.

S – Servo.

s – Variável de Laplace.

SE – Função que considera os efeitos de saturação da excitatriz.

T – Constante de tempo do servomotor.

t – Tempo.

T'_{do} – Constante de tempo de eixo direto de máquina em vazio.

t_0 – Instante inicial.

T_A – Constante de tempo integral do regulador de tensão.

Td – Constante de tempo do estatismo transitório.

T_E – Constante de tempo da excitatriz.

TEL – Torque elétrico.

t_f – Instante final.

t_s – Tempo de assentamento da resposta.

T_T – Tempo para sistemas discretizados.

Tw – Constante de tempo de inércia da água.

u – Vetor de entradas.

U(k) – Vetor de movimentos futuros.

u1c, u2c – Sinais de controle para controlador MPC com restrição.

u1s, u2s – Sinais de controle para controlador MPC sem restrição.

$\mathbf{U}_{max}$, $\mathbf{U}_{min}$ – Limites para o vetor **U**.

V – Tensão da Barra infinita.

v(k) – Perturbação medida.

V1, V2 – Tensões entre diferentes pontos de transferência de potência.

V_F – Tensão de campo.

V_{f0} – Fator de normalização.

V_{F0} – Tensão de campo inicial.

V_{REF} – Tensão de referência.

VT – Tensão terminal.

W – Matriz compostas por matrizes dinâmicas.

w(k), **z**(k), **e**(k) – Perturbação não medida.

x(0) – Vetor de estados iniciais.

x, $\mathbf{x}_n$ – Vetor dos estados.

X0 – Ponto inicial da trajetória dos estados no plano de fases.

x_{12} – Impedância de interligação entre duas áreas.

$\mathbf{x}_a$ – Vetor de estados medidos.

xb – Vetor de estados não medidos.

Xe – Ponto inicial da trajetória dos estados no plano de fases.

Y – Abertura do distribuidor.

y – Vetor de saídas.

$\mathbf{y}^*$ – Vetor de efeitos dos movimentos passadas.

$\mathbf{y}_0$ – Vetor de condições iniciais das saídas.

Y10 – Admitância shunt na barra de saída da intalação.

Y12 – Admitância da linha de transmissão.

y1c, y2c – Saídas para controlador MPC com restrição.

y1s, y2s – Saídas para controlador MPC sem restrição.

$\mathbf{Y}_d$ - Matriz constante utilizada para o cálculo de $\boldsymbol{\psi}$(k).

$\mathbf{y}_s$ – Vetor de saídas desejadas.

$\mathbf{Y}_v$ – Matriz constante utilizada para o cálculo de $\boldsymbol{\psi}$(k).

$\mathbf{Y}_x$ – Matriz constante utilizada para o cálculo de $\boldsymbol{\psi}$(k).

Z – Matriz dinâmica que contem a informação de restrição.

$\mathbf{z}_{QDMC}$(k+1) – Vetor que contem a projeção dos desvios das restrições com relação a seus limites.

Símbolos Gregos

$\angle\delta, \angle 0$ - Ângulo entre o rotor e o campo de reação da armadura.

$\mathbf{\Omega}$ - Matriz resultante da composição de uma matriz de zeros e uma matriz identidade, usada na formulação do observador mínimo.

λ - Multiplicador de Lagrange.

δ - Ângulo de potência.

χ - Autovalores.

ς - Coeficientes da equação característica.

τ - Constante de tempo de escoamento do regulador de velocidade (*washout*).

ω - Freqüência elétrica.

$\mathbf{\Phi}$ - Matriz **A** para sistemas discretos.

$\mathbf{\Gamma}$ - Matriz **B** para sistemas discretos.

$\mathbf{\Xi}$ - Matriz de penalização dos resíduos - DMC.

$\mathbf{\Lambda}$ - Matriz de supressão e restrição dos movimentos de saída.

π - Número irracional – 3.14159265359

φ - SE-K_E.

Δ - Variação

η - Variável auxiliar utilizada na formulação do observador mínimo.

υ - Variável de integração.

ι - Variável de integração.

ξ - Vetor de desvios das saídas em relação aos *setpoints*.

$\Delta\omega$ - Variação de freqüência elétrica.

λ_ν , λ_ζ - Multiplicadores de Lagrange.

$\Delta\mu(k)$ – Variação da variável manipulada.

$\Theta(\mathbf{A})$ – Valor numérico da substituição da matriz **A** na equação característica.

$\delta(k)$ - Parâmetro usado no cálculo de $\Delta\mu(k)$.

$\zeta(k)$ - Variáveis de folga.

$\nu(k)$ – Variável independente definida para resolução da otimização QP do MPC.

$\mu(k)$ - vetor de valores futuros das variáveis manipuladas.

$\psi(k)$- Vetor das saídas para problema MPC.

$\gamma(t)$, $e^{(...)t}$ – Matriz exponencial ou matriz de transição.

ε, β, c – regiões do espaço.

δ_0 - Ângulo de potência inicial.

ω_0 – Freqüência elétrica base.

$\boldsymbol{\Gamma}_m$ – Partição de $\boldsymbol{\Gamma}$ referente à **m**.

ΔP – Variação de potência.

$\boldsymbol{\Gamma}_v$ – Partição de $\boldsymbol{\Gamma}$ referente à **v**.

$\boldsymbol{\Gamma}_w$ – Partição de $\boldsymbol{\Gamma}$ referente à **w**.

$\boldsymbol{\Gamma}_z$ – Partição de $\boldsymbol{\Gamma}$ referente à **z**.

Sobrescritos:

• - Derivada.

^- Futuro.

~ - Estimado.

T – Transposta.

Subscrito:

m, n – índices na formulação da DMC.

Máx – Máximo.

Mín. – Mínimo.

Ref, r – Referência.

RESUMO

MODELAGEM E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE MODERNO A SISTEMAS REGULADORES DE VELOCIDADE E TENSÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Cláudio Homero Ferreira da Silva
Agosto, 2002

Orientador: Humberto Molinar Henrique
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - UFU

Em pequenas centrais hidrelétricas o sistema de controle é bastante simplificado montado até de forma primitiva e arcaica, embora funcional. A atuação deste sistema determina a qualidade da energia, a estabilidade e a integridade física da própria máquina e do sistema elétrico em que ela está inserida. Baseado na atual situação do sistema elétrico nota-se uma tendência de reativação, construção e modernização de PCH's, a fim de aumentar o suprimento de energia de forma rápida e com baixos custos financeiros e ambientais. O desenvolvimento de importantes ferramentas teóricas juntamente com o uso de computadores digitais possibilitou a introdução de diversas melhorias sobre a estrutura de controle automático, buscando manter a estabilidade do processo sob quaisquer condições, mesmo na presença de desvio planta/modelo ou ainda com ruídos de medidas. Foram propostas algumas alterações físicas na planta de forma a fornecer significativa melhoria no comportamento da malha fechada do controle de velocidade e controle de tensão. A capacidade de decisão e a flexibilidade de um programa de controle são as maiores justificativas para a pesquisa de um processo submetido ao controle moderno. Pretende-se incorporar este pacote de controle computacional à controladores lógicos programáveis (CLP) ou computadores de processo. Os dados experimentais da Pequena Central Hidrelétrica dos Martins (4 x 2750 KVA), situada no município de Uberlândia, de propriedade da CEMIG foram utilizados para identificar e validar o modelo do sistema. Foram avaliadas técnicas de controle por colocação de pólos, controle ótimo e controle preditivo baseado em modelo (MPC), considerando-se modelagem perfeita e também o caso de desvio planta/modelo. Considerou-se ainda a presença ou não de observadores de estado (de ordem plena e ordem reduzida) a fim de estimar os estados não medidos. Os resultados das simulações mostram que o desenvolvimento dos controladores é promissor para a regulação do sistema. A proposta oferece uma ampla flexibilidade de controle levando em conta o desvio planta/modelo e a questão da estabilidade. Estes resultados contribuem para a melhoria da qualidade da energia associada com redução de custos no processo de geração de energia.

ABSTRACT

MODELLING AND APPLICATION OF MODERN CONTROL TECHNIQUES TO GOVERNOR AND VOLTAGE REGULATOR SYSTEMS OF SYNCHRONOUS MACHINES OF SMALL HYDROELECTRIC PLANTS

Cláudio Homero Ferreira da Silva
August, 2002

Advisor: Humberto Molinar Henrique
Program of Masters degree in Chemical Engineering - UFU

In small hydroelectric plants the control system is quite simplified. It is sometimes mounted in a primitive and archaic way although it is functional. Performance of this system determines the final quality of the energy, stability and physical integrity of the apparatus as well as the whole electric system. Based on the present situation of the electric system, it is noticed a tendency in building and modernizing early small hydroelectric plants in order to increase energy supply very fast with low cost and satisfying environmental constraints. The development of mathematical tools and digital computer facilities have made possible the use of advanced automatic control structures that take into account the process stability even in presence of noise measurement and plant/model mismatch. Physical modifications in the plant are proposed in order to provide significant improvement in closed loop behavior of the turbine speed and terminal voltage control. The decision ability and flexibility of the computer package to be developed are the major aspects that support this research. It will be intended to incorporate this control computer package into a programmable logical controller (PLC). Experimental data from CEMIG´s Martins Hydro Plant (4 x 2750 KVA), located in Uberlândia - Brazil were used to identify and validate the system model. Pole placement, optimal control and model predictive control (MPC) techniques were used to controller design. Perfect modeling and plant/model mismatch were considered in both presence and absence of state observers (full order and reduced order) in order to become accessible unmeasured states. Simulation results show developed controllers are promising for the system regulating. The proposed approaches offer a larger control flexibility taking into account plant/model mismatch and stability questions. These results contribute to a quality energy improvement associated to a cost reduction in energy generation process.

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1 Breve Histórico

O processo de geração de energia elétrica é bastante amplo e complexo, envolvendo vários campos de engenharia. Através de estudos geológicos é possível detectar na natureza locais que forneçam condições para a implantação de uma usina hidrelétrica. A partir daí seguem: o desenvolvimento do projeto, as negociações de desapropriação para as áreas inundadas, a busca de financiamentos, contratos com fornecedores de materiais e mão-de-obra, busca de alternativas e compensações ao meio ambiente, a aprovação do governo, execução dos projetos civil, mecânico e elétrico, recepção e comissionamento dos equipamentos e finalmente a entrada em operação da instalação. Muitas destas atividades têm de ser desenvolvidas pautadas em normas de qualidade (ISO 9000) e de meio ambiente (ISO 14000) como forma de agilizar o processo, facilitar a obtenção de licenças e ter um elevado conceito perante a sociedade.

Uma usina hidrelétrica, dependendo do local de sua instalação, poderá aproveitar a energia sob as formas de vazão e queda. As usinas de vazão são instaladas em pontos de grandes fluxo e velocidade, possuindo pequena variação no reservatório e sem grandes extensões inundadas, visto não haver necessidade de acúmulo. As usinas de reservatório aproveitam quedas e necessitam de grandes reservatórios, havendo a inundação de grandes porções de terra. Estas instalações regularizam a vazão dos rios sendo responsáveis por parte da energia que será utilizada futuramente em caso de necessidade, pois suas reservas são suficientes para vários meses.

Na barragem existem comportas que dão acesso a água às tubulações e que a levam às unidades geradoras, onde a energia potencial da água se transforma em energia cinética. Ao chegar na turbina da máquina a água realiza trabalho mecânico sobre a mesma, transformando a energia cinética em rotação do eixo da unidade onde está acoplado o gerador. Com isto, devido às leis do eletromagnetismo, um campo magnético produzido no rotor do gerador da

unidade criará o fluxo magnético girante no estator gerando assim uma força eletromotriz induzida.

Uma ampla rede de serviços auxiliares, porém essencial, das formas mais variadas é exigida para a garantir a eficiência e a qualidade final do produto que é a energia para o consumidor. Destes sistemas citam-se: sistemas de ventilação e exaustão; circuito de água industrial (refrigeração da unidade) e água de serviço (uso geral); circuitos de ar comprimido para diversas finalidades; sistema de proteção contra incêndio; equipamentos de transformação física, como filtros e equipamentos de troca térmica. Os sistemas de medição e proteção possuem, no entanto, maior influência sobre a qualidade do produto como mostram as descrições a seguir:

- Sistema de medição: basicamente as medidas feitas são de temperatura, nível e pressão, no aspecto mecânico e de corrente e tensão no aspecto elétrico, podendo-se obter daí várias medidas compostas. Existem medidas que necessitam ser transduzidas como, por exemplo, a vazão. São estas medidas que serão referências para os reguladores e para o acompanhamento do processo.
- Sistemas de proteção: muitos são os pontos que necessitam de permanente monitoramento em uma usina hidrelétrica. Uma maneira relativamente fácil e barata é a utilização de relés, que são basicamente controladores *On-Off*, e circuitos elétricos, estes com a finalidade de proteger os vários equipamentos e mantê-los em níveis admissíveis e adequados de operação. Existe um valor ajustado de limite, ou *setpoint*, que é colocado em comparação como a grandeza medida, direta ou por meio de transdução. Estando esta dentro do valor de ajuste nada ocorre, porém ultrapassando o mesmo, acima ou abaixo, dependendo da característica da proteção, o circuito é desligado. Através de esquemas elétricos e/ou eletrônicos é feita toda a automatização das unidades geradoras. Circuitos elétricos com seus contatores e relés realizam uma amplificação de sinal permitindo o comando de grandes sistemas
- Sistemas de regulação: é de suma a importância para a unidade de produção possuir um sistema de controle e supervisão adequado às necessidades do processo. A figura do operador serve em alguns casos como um elemento final de controle, alternador de *setpoint*, ou ainda peça chave na supervisão de todo o processo.

1.2 Importância

Nas pequenas centrais, até mesmo pelo porte dos equipamentos, não se faz necessário tamanho aparato sendo suficientes sistemas bastante simplificados. Sistemas de medição, de troca térmica e de proteção e regulação muitas vezes tratam-se de sistemas montados até de forma primitiva e arcaica embora funcionais.

Sem dúvida, os mais importantes sistemas de controle de uma máquina elétrica são o controle de potência ativa/freqüência e o controle de potência reativa/tensão, uma vez que a qualidade final da energia gerada e a própria estabilidade do sistema (da máquina e de toda a rede elétrica) dependem de como é a atuação do controlador sobre o processo. Nas usinas modernas e, geralmente, nas grandes instalações, estes sistemas são constituídos de módulos eletrônicos, circuitos integrados acoplados a computadores e complexos sistemas digitais de supervisão e controle (SDSC). As instalações de pequeno porte não possuem capacidade suficiente para provocar distúrbios no sistema ou instabilizar a malha em que estejam inseridas, como o fazem grandes instalações. Porém, a estabilidade da máquina, a eficiência e a preservação de seus componentes elétricos e mecânicos são totalmente dependentes da atuação da regulação sobre a mesma.

A teoria de controle aliada à tecnologia tem proporcionado grandes avanços, mas na maioria dos sistemas de comando pode-se notar a utilização de estratégias clássicas como controle proporcional-integral (PI) aliado à performance, à rapidez e à sensibilidade de acordo com a conveniência e a necessidade exigida.

Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's), que no passado foram responsáveis por grande parte do suprimento de energia, foram desativadas ao longo das últimas décadas dando lugar a grandes instalações elétricas devido à economia de escala que tais empreendimentos oferecem. Porém, o panorama do sistema elétrico brasileiro, face à crise energética, indica uma tendência de reativação, construção e modernização de PCH's, a fim de aumentar o suprimento de energia de forma rápida e com baixos custos financeiros e ambientais.

O desenvolvimento de importantes ferramentas tais como discretização, transformada Z, projeto e análise de controladores no domínio discreto, juntamente com o uso de computadores digitais possibilitou a introdução de diversas melhorias no processo de controle automático. Conceitos como espaço de estados, estabilidade segundo Lyapunov, controladores ótimos, controladores ótimos – estocásticos (filtros de Kalman) e controle preditivo (MPC) certamente possibilitam controlar grande número de processos, pois atuam nas formas

discretas ou contínuas, lineares ou não-lineares, variantes ou invariante no tempo, buscando levar o processo à estabilidade sob quaisquer condições, mesmo na presença de erros ou alterações do modelo controlado ou com ruídos de medidas.

1.3 Justificativas

A capacidade de decisão e a flexibilidade de um programa de controle são as maiores justificativas para a pesquisa de um processo submetido ao controle moderno segundo OGATA (1987). Grande parte das instalações hidráulicas de pequeno porte utiliza-se basicamente de instrumentos e equipamentos mecânicos para efetuar os controles do processo de geração de energia elétrica, na maioria das vezes com estratégias clássicas e simplificadas de baixa confiabilidade e de difícil reposição. Tais sistemas demandam grande mão-de-obra de serviço e constantes manutenções com a utilização de pessoas de profundo conhecimento técnico na execução das atividades. Pode-se notar que o envelhecimento das instalações tem concorrido para o aparecimento de falhas graves e cada vez mais freqüentes demandando grandes trabalhos de recuperação tornando o processo expressivamente oneroso como sugeriu GOMES (1985). Um estudo de técnicas modernas de controle, além de oferecer uma maior flexibilidade, possibilita melhor avaliação de diversas estratégias, podendo levar em conta desvios do modelo, resultando em uma maior confiabilidade no processo de regulação, contribuindo assim para a melhoria na qualidade de fornecimento de energia com redução de custos.

Este estudo visa investigar a possibilidade real de implantação de tais técnicas. Outra vantagem do uso de técnicas mais compactas é a possibilidade da comparação e do controle simultâneo do processo com baixo custo pelo uso dos chamados Controladores Lógicos Programáveis (CLP), de fácil reposição e aquisição no mercado nacional.

1.4 Delimitações do Assunto e Formulação de Hipóteses

A proposta deste estudo é a realização de uma alteração física na estrutura da planta, substituindo-se a atuação do regulador de velocidade mecânico por uma eletroválvula na parte superior da válvula piloto e o regulador de tensão, do tipo reostático, por um controlador estático baseado nos SCR (*Silicon Controled Rectified*) ou retificadores especiais denominados tiristores de potência. Neste caso a lei de controle deve ser implementada de forma conjunta para as duas malhas de controle (MIMO – múltiplas entradas múltiplas saídas) em um computador que é interfaceado por um sistema de aquisição de dados que executará a manipulação das entradas conforme o estabelecido pelo código computacional implementado. Durante os estudos foram avaliadas criteriosamente as alterações que viabilizaram a nova estrutura.

O estudo é baseado no modelo do processo completo apresentado por ANDERSON (1982), aplicando-se as considerações gerais inerentes ao sistema e resultante da aplicação das técnicas das transformações de Park. Alguns dos parâmetros apresentados foram linearizados nos valores nominais de trabalho da máquina de forma a se obter um modelo linear representativo deste processo. As funções de transferência são resultantes do levantamento e identificação do sistema e seus parâmetros foram validados por ensaios de campo e pela análise do comportamento operativo como mostrou GOMES (1992).

Um parâmetro de grande relevância na regulação da freqüência é o estatismo permanente. De forma simplificada ele expressa a relação entre a queda de freqüência e a potência. Devido à importância deste parâmetro, que atua no controle primário da unidade e no controle suplementar como foi mostrado por KIMBARK (1956), o mesmo foi levado em consideração na proposta do novo. Os novos atuadores inseridos neste processo são: uma ponte de retificadores estáticos e uma válvula solenóide. As funções de transferência destes atuadores foram consideradas unitárias, uma vez que se tratam de processos muito rápidos onde a resposta é imediata. Na prática esta é uma consideração razoável. Porém a confirmação de que está consideração não influencia o processo somente pode ser feita com a obtenção da dinâmica exata de tais atuadores, sendo necessário para tal a especificação de projeto, o que está fora dos propósitos deste trabalho.

1.5 Objetivos da Pesquisa

Objetivo deste trabalho é desenvolver um *software* específico para o controle de velocidade e tensão de máquinas síncronas a partir da modelagem e da aplicação de técnicas de controle moderno. O trabalho criará um *software* de controle que será aplicado em instalações hidráulicas de pequeno porte, por intermédio do uso de controladores lógicos programáveis (CLP). A simulação e a validação do *software* serão feitas no modelo da Pequena Central Hidrelétrica dos Martins (4 x 2750 KVA), situada no município de Uberlândia, de propriedade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Durante a operação de uma unidade de produção qualquer, muitos requisitos impostos pelo projeto e pela operação devem ser satisfeitos, podendo ser atribuídos como principais a segurança, o pronto atendimento as especificações do produto, a interferência das regulamentações governamentais sobre a atividade, as condições operacionais e os fatores econômicos e sociais. Tais requisitos necessitam de monitoramento contínuo e controle aplicado, garantido que os objetivos operativos sejam satisfeitos.

As principais necessidades de controle são a supressão de influências ou perturbações externas, a manutenção da estabilidade e obtenção de performance ótima no processo, como mostrou STEPHANOPOULOS (1984). Diante destas questões, muitos avanços na teoria de controle ocorreram nas últimas décadas, fruto de árduo trabalho de pesquisa. Porém estima-se que a vasta maioria de laços de controle na indústria mundial ainda implementa uma estratégia do tipo PID (proporcional-integral-derivativa). Assim, pode-se concluir que os sistemas computacionais de controle estão sub-utilizados. Entretanto um forte argumento a favor deste fato é que muitos problemas industriais de controle são bastante simples e um controlador PID ou mesmo PI conduz a soluções satisfatórias. Isto acarreta num arrefecimento da vontade de aplicar uma técnica de controle mais avançada a esta larga classe de problemas. Nesta direção, técnicas mais avançadas de controle são, então, reservadas para problemas complexos onde elas podem realmente prover uma significativa melhoria no desempenho do processo em relação a técnicas tradicionais. Embora exista um número reduzido dos chamados processos complexos, do ponto de vista do controle, em relação aos problemas de processo de controle como um todo, eles envolvem variáveis críticas de processo com forte efeito sobre o objetivo de controle, tais como qualidade do produto final, operacionalidade do processo e padrões ambientais. O termo *controle avançado de processos* é subjetivo, com significado diferente para diferentes pessoas, dependendo da sua experiência prévia no campo

de controle. A tabela 2.1 apresenta uma classificação subjetiva apresentada por SEBORG (1994).

TABELA 2.1: CLASSIFICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE SEGUNDO SEU USO NA INDÚSTRIA.

Categoria	Estratégias
Categoria 1	Estratégias convencionais: controle manual; controle PID; controle de relação; controle cascata; controle *feedforward*.
Categoria 2	Controle avançado (técnicas avançadas): *gain scheduling*; compensação de tempo morto; controle por desacoplamento de laços.
Categoria 3	Controle avançado (técnicas muito utilizadas): controle preditivo baseado em modelos (MPC); controle estatístico de processos; controle por modelo interno (IMC); controle adaptativo.
Categoria 4	Controle avançado (técnicas mais novas com algumas aplicações industriais): controle ótimo (LGQ); sistemas especialistas; controle não-linear; neuro-controladores; controladores *fuzzy*.

2.2 Importância dos sistemas de controle

Sistemas de controle automático são largamente difundidos e utilizados pelos diversos processos que a atividade humana gera, agindo como elementos promotores do progresso e do desenvolvimento, representando um papel vital no avanço da ciência e da engenharia, como mostrou OGATA (1993). Os avanços na teoria e na prática de controle permitem a obtenção de desempenho ótimo em sistemas dinâmicos, melhoria na produtividade, alívio de trabalhos repetitivos e rotineiros, exigindo, porém, profundo conhecimento do processo por aqueles que nele trabalham.

2.3 Fundamentos, Evolução Histórica e Perspectivas.

Como mostrou D'ÁZZO (1981), um dos mais antigos sistemas de controle em malha aberta foi o dispositivo de Hero para abrir as portas de um templo e que, desconhecido pelas massas, criava uma atmosfera de misticismo. O primeiro trabalho significativo em controle automático foi o de James Watt que construiu um controlador centrífugo para controle de velocidade de uma máquina a vapor no século XVIII. Maxwell, em 1868, fez um estudo analítico da estabilidade deste regulador sendo este trabalho seguido por uma solução mais detalhada, idealizada pelo engenheiro russo Wischenegradsky. Em 1922, Minorsky trabalhou

em controladores automáticos para pilotagem de navios e realizou uma das primeiras aplicações de elementos não lineares em sistemas em malha fechada e mostrou como poderia ser determinada a estabilidade a partir de equações diferenciais que descrevem o sistema. Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento relativamente simples para a determinação da estabilidade de sistemas de malha fechada com base na resposta do sistema em malha aberta a entradas senoidais. Em 1934, Hazen introduziu o termo servomecanismo para sistemas de controle de posição e discutiu o projeto de servomecanismos capazes de seguir de perto uma entrada variável. Também em 1934, Black discutiu a respeito de amplificadores realimentados. Devido às restrições impostas pela II Guerra Mundial, os desenvolvimentos no período foram pouco conhecidos retardando o progresso na teoria de controle, mas centros de estudos e empresas prosseguiam em suas pesquisas e logo após a suspensão das restrições, levaram este campo da ciência a experimentar um rápido progresso que foi acelerado pelo desenvolvimento de computadores e sua utilização com a finalidade de decifrar os sistemas de controle, gerando assim farta literatura. Neste período foi desenvolvido o método de resposta em freqüência, que possibilita ao engenheiro projetar sistemas lineares em malha fechada de forma a atender certos requisitos. Contribuições significativas à teoria de controle foram fornecidas por Ziegler e Nichols (1942) e Bode (1945). No final da década de 40 e início da década de 50, Evans desenvolveu completamente o método do lugar das raízes.

A teoria de controle clássica é baseada nos métodos citados acima e levam sistemas que são estáveis a satisfazer a certos conjuntos de desempenho mais ou menos arbitrários de forma aceitável, aplicável a sistemas SISO (*Single-Input-Single-Output*), lineares e invariantes no tempo, porém não são ótimos em qualquer sentido expressivo. No passado foi largamente utilizada para projeto e análise de processos, principalmente ligados à área de engenharia elétrica e comunicações. Esta teoria foi aplicável a vários problemas de projeto de controle da década de 40 até meados da década de 70, utilizando-se basicamente controladores mecânicos elétricos ou pneumáticos, como mostrou RAY (1983), sendo ainda hoje largamente utilizada.

A descrição dos processos modernos requer um grande número de equações em virtude de estes possuírem muitas entradas e saídas, sendo que a teoria clássica não é a melhor teoria a ser aplicada em tais sistemas. Com o advento dos computadores que, com a evolução da tecnologia, tornaram-se cada vez mais baratos e potentes, houve grande avanço no tratamento dos sistemas de controle de modo a permitir simulações e práticas cada vez mais complexas, com a criação de procedimentos de projeto e identificação, aquisição de dados e controle em tempo real.

Ao longo das décadas de 40 seguindo-se até os dias de hoje, vários tópicos foram tratados como mostraram RAY (1983), SEBORG (1994), HENSON e SEBORG (1997) e HENRIQUE (1999), a saber:

- A programação e o arranjo completo de controle na planta, envolvendo alocação de matéria-prima ao longo da produção com controle em tempo real;
- Projeto de controle multivariável e controle de laços com interação, tendo mais de 25 anos de pesquisas e ainda não sendo capaz de resolver a todos os problemas a que se propõem. O projeto e o ajuste do controlador está sendo desenvolvido, buscando uma aproximação entre a boa performance (controlador de alto ganho e sensibilidade para variação de parâmetro) e a robustez (controlador de baixo ganho e resposta lenta). Muitos artigos tratam da observabilidade, controlabilidade, estabilidade na malha fechada, compensação de interações e controle ótimo, ligados à teoria de espaço de estados, que será tratada em especial na seção subseqüente. Existe um interesse especial na compensação do tempo morto, por exemplo, com *Smith preditor,* como mostrou SEBORG (1994). Muitas novas estratégias têm sido desenvolvidas com a nomenclatura de estratégias de controle preditivo, como: MAC (*Model Algorithmic Control*) mostrado por SEBORG (1994); DMC (*Dynamic Matrix Control*) como mostrou CUTLER apud GARCIA e MORSHEDI (1982) e IMC (*Internal Model Control*) mostrado por MORARI (1981). Todos estes métodos são baseados no conceito de que o controlador assume aproximadamente a forma inversa da planta, levando a processos com um “controle perfeito”, mas nem todos os processos podem ser sintonizados nesta forma.
- Problemas ligados à falta de sensores ou de medidas para o controle *on-line.* Para estes casos foram desenvolvidos os estimadores de estado, havendo numerosos caminhos para sua construção, e tendo como mais comum à aproximação envolvendo o estimador e os filtros de Kalman para processos estocásticos e os observadores de estado para processos determinísticos. Existe ainda o estudo de controle de processos por medidas secundárias.
- Projeto e sistemas de controle altamente sensíveis e que possuem o poder de controle limitado, principalmente em processos não-lineares.
- Projeto de sistemas de controle para processos com parâmetros distribuídos, ligados principalmente à indústria química, na forma de reatores tubulares e

colunas recheadas para transferência de massa, e que envolve a necessidade de uma alocação ótima dos sensores, uma melhor localização dos atuadores e aplicação de controle robusto para a obtenção de sucesso nos objetivos desejados.

- Controle adaptativo, a fim de atender a processo que possuem variação temporal das características dinâmicas, sendo desenvolvidos métodos como *Self-Tunning-Regulator*, originalmente criado por ÅSTRÖM apud RAY (1983) para sistemas SISO e sendo estendido para sistemas MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) por vários pesquisadores na década de 80. O uso de técnicas preditivas juntamente com procedimentos de identificação *on-line* também pode ser classificado como de controle adaptativo. Uma pesquisa sobre o assunto foi feita por SEBORG et al. (1986).
- No controle não-linear todas as técnicas aplicadas a sistemas lineares para estimação e controle podem ser aplicadas a estes sistemas se for usado um modelo linearizado na faixa de operação da planta. Isto nem sempre é possível devido a características próprias do processo além do que, controlar processos não lineares baseado em técnicas lineares leva a uma ação muito lenta do controlador na região de operação, tornando o controle impraticável, fazendo-se necessário o desenvolvimento de estratégias de controle baseadas em modelos não-lineares. Destas podemos citar: estratégias de controle desenvolvidas baseadas em modelos como IMC e GMC (*Generic-Model-Control*) e MPC (*Model-Predictive-Control*), e controladores baseados em modelos inversos de processos usando modelos fenomenológicos e empíricos como NARMAX (*Nonlinear AutoRegressive Moving Average model with eXogenous inputs*) incluindo redes neuronais e modelos de Hammerstein e o projeto analítico do controlador desenvolvido baseado nos modelos de linearização exata ou aproximação por geometria diferencial, levando o processo a exibir uma estabilidade nominal, como mostrou HENSON e SEBORG (1991). Embora existam vantagens na aplicação desta teoria, nos casos em que ela é compatível, persistem ainda algumas dificuldades como a análise de performance e estabilidade do laço fechado de sistemas não-lineares.
- Técnicas de inteligência artificial como sistemas baseados no conhecimento, ligados a monitoramento de atividade e controle supervisório; redes neuronais utilizadas de forma eficiente no desenvolvimento de modelos empíricos não-

lineares para uma grande variedade de fenômenos físicos, aplicados principalmente na identificação de modelos considerados difíceis e complexos como mostraram HIMMELBLAU e HOSKINS (1988) e lógica *fuzzy*, que provê uma estrutura conceitual para problemas práticos onde algumas variáveis de processo são representadas como variáveis lingüísticas que só podem assumir alguns possíveis valores e podem ser processadas usando um conjunto de regras. Como exemplo da aplicação desta teoria cita-se o trabalho realizado por KAVSEK-BIASIZZO et al. (1997). A inteligência artificial é um campo de pesquisa recente, com ampla perspectiva de evolução.

- Uma evolução na instrumentação aliada a sistemas computadorizados possibilitou o monitoramento e diagnóstico *on-line*, constituindo o conhecido controle estatístico de processos amplamente aplicado na indústria na década de 80 como mostrou SEBORG (1994).

Todos estes tópicos, de maneira resumida, mostram a evolução dos sistemas de controle, sua problemática e tendências de pesquisa para o futuro, uma vez que se trata de um campo novo e vasto. Na medida em que se consegue resolver os problemas de controle vai-se evoluindo na teoria aumentando a área de atuação e agregando-se valor ao processo.

A utilização de sistemas computadorizados em sistemas de controle possibilitou um grande avanço em termos de capacidade de processamento, influenciando nas aplicações práticas, porém trazendo consigo problemas específicos tais como a convergência de soluções, o esforço computacional e a complexidade devido ao algoritmo utilizado. BLONDEL e TSITSIKLIS (2000) desenvolvem uma reflexão histórica, considerando particularmente o problema da estabilidade em sistemas lineares, incertezas paramétricas, o controle robusto, sistemas variantes no tempo, sistemas não-lineares e sistemas híbridos e controle ótimo estocástico.

2.4 Teoria de Espaço de Estados

Desde 1960, aproximadamente, devido à disponibilidade dos computadores digitais que ao longo do tempo se tornaram cada vez mais potentes e populares, foi possível a análise de sistemas complexos no domínio do tempo. A teoria de controle moderna, baseada na análise e síntese no domínio do tempo usando as variáveis de estado, tem sido desenvolvida para competir com a complexidade crescente de processos e requisitos rigorosos em termos de precisão, peso e custo de aplicações, podendo ser utilizada em sistemas lineares e não-lineares, variantes ou invariantes no tempo e sistemas MIMO, segundo OGATA (1993).

O estado de um sistema dinâmico é o menor conjunto de variáveis, chamadas de variáveis de estado, tal que o conhecimento destas em $t = t_0$, junto com o conhecimento da entrada para $t \geq t_0$, determina completamente o comportamento do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$. O espaço n-dimensional cujos eixos coordenados consistem no eixo $x_1,...,x_n$ é chamado de espaço de estados, onde qualquer estado pode ser representado por um ponto neste espaço. O interesse na análise em espaço de estados está focado nas variáveis de entrada (**u**), nas variáveis de saída (**y**) e nas variáveis de estado (**x**). A representação em espaço de estados não é única, podendo o sistema ser representado de diversas formas, porém o número de variáveis de estado necessário é o mesmo para qualquer forma de representação mínima.

A Eq. 2.1 mostra a equação de estado do sistema linear e invariante no tempo, cuja estrutura é alvo de estudos neste trabalho, onde **A** é a matriz de estado, **B** a matriz de entradas e a Eq. 2.2 mostra a equação de saída, onde **C** é a matriz de saídas e **D** é a matriz de transmissão direta, para o mesmo sistema. Na Figura 2.1 é mostrada a representação em diagrama de blocos.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \tag{2.1}$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \tag{2.2}$$

Segundo OGATA (1993), existem dois importantes conceitos que garantem duas importantes propriedades verificadas nos sistemas controlados utilizando a teoria de controle ótimo, sendo eles: <u>controlabilidade</u> e <u>observabilidade</u>. Pela controlabilidade garante-se que através de uma entrada **u**(t), haverá a transferência de um determinado estado $\mathbf{x}(t_0)$ ao estado correspondente $\mathbf{x}(t_1)$ num intervalo de tempo finito demonstrando que a entrada **u**(t) possui influência sobre todos os estados **x**(t).

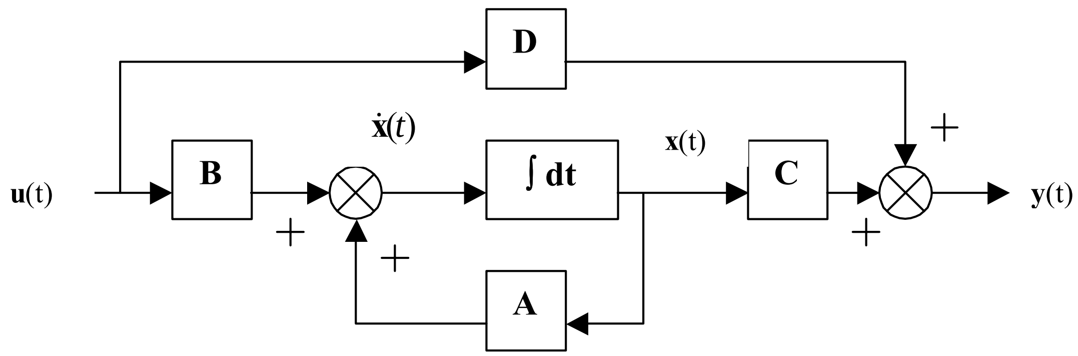


Figura 2.1 – Diagrama de blocos do sistema de controle linear e contínuo no tempo representado em espaço de estados.

A controlabilidade expressa a condição matemática para a possibilidade de solução do problema de controle em espaço de estados. Pela observabilidade conhece-se o vetor de estados **x**(t) a partir de simples inspeção das saídas **y**(t) e das entradas **u**(t), demonstrando a garantia de que todo estado influencia em todas as saídas. A observabilidade expressa a condição matemática para a modelagem e obtenção dos observadores para os casos onde não se consegue medir o estado. Para um dado sistema de controle, a estabilidade é geralmente o tópico mais importante a ser determinado. Existem vários critérios de estabilidade para sistemas lineares e invariantes no tempo que possuem aplicação limitada pois muitos processos possuem comportamento não-linear e variante no tempo. Para a teoria de espaço de estado a avaliação da estabilidade é bastante simples, bastando apenas inspecionar os autovalores da matriz **A** ou da nova matriz de estados que se forma após a realimentação de estados. Se a parte real destes autovalores for negativa o sistema será estável. Foi necessária a extensão do conceito de estabilidade a sistemas não lineares. É desejável que a estabilidade fosse determinada sem a obtenção explícita dos autovalores, o que é particularmente importante para sistemas de ordem elevada. Neste sentido Lyapunov contribuiu com seu estudo. A análise do comportamento das chamadas trajetórias de estado dita as tendências de acomodação ou não de um determinado estado em relação a um estado passado. Trata-se de um método mais geral, sendo aplicável a sistemas lineares e não-lineares, variantes ou invariantes no tempo e ainda na resolução de alguns problemas de otimização, como mostrou OGATA (1993). A garantia de que toda trajetória não compromete a estabilidade do sistema confirma a condição de estabilidade global. Existem sistemas que podem apresentar estabilidade local sem necessariamente apresentar estabilidade global. Também é definida a condição de estabilidade assintótica em que as trajetórias sempre tendem a um mesmo ponto de equilíbrio. A Figura 2.2 mostra algumas trajetórias que exemplificam esta teoria.

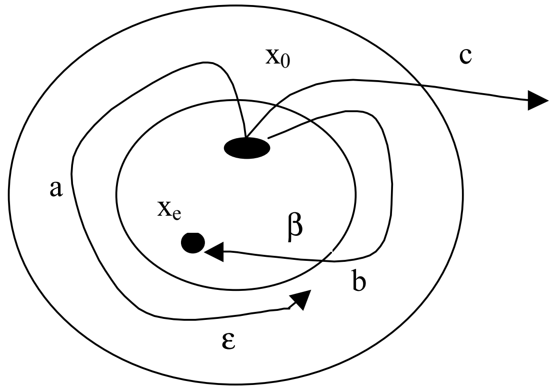


Figura 2.2 – Trajetórias do plano de estados: a- Estabilidade de Lyapunov; b- Estabilidade assintótica; c- Instabilidade

2.4.1 Controle de sistemas por colocação de pólos.

Admitindo que o sistema seja completamente controlável pelos estados e que todas as variáveis de estados são medidas e estão disponíveis para a realimentação, então os pólos da malha fechada podem ser colocados em quaisquer posições desejadas por meio de realimentação de estado, através de uma matriz de ganho de realimentação de estado apropriada (**K**), mostrada na Eq. 2.3 e ilustrado pela Figura 2.3. Está técnica é baseada nos requisitos de resposta transitória e/ou resposta em freqüência, bem como de resposta de regime estacionário.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} \tag{2.3}$$

Um método bastante comum para a determinação da matriz de realimentação **K** é dado pela fórmula de Ackermann como mostrou OGATA (1987), mostrado na Eq. 2. 4.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \boldsymbol{\Theta}(\mathbf{A}) \tag{2.4}$$

Onde $\boldsymbol{\Theta}(\mathbf{A})$ é o valor numérico obtido da substituição da matriz **A** na equação característica do sistema dada por $\boldsymbol{\Theta}$ e a matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \dots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1}$ é a matriz de controlabilidade do sistema.

A matriz **K** não é única e depende da localização dos pólos desejados e expressa um compromisso entre a rapidez da resposta do vetor erro e a sensibilidade às perturbações e aos ruídos de medição. Para sistemas de altas ordens, a localização dos pólos da malha fechada e o comportamento da dinâmica do sistema não são facilmente correlacionáveis, sendo necessário o uso de simulações para avaliação das respostas dinâmicas, escolhendo a que melhor atende aos requisitos de controle. HUANG; SHAH (1998) mostraram um ponto de referência para uso e especificação da dinâmica da malha fechada com relação à performance

em estado estacionário da malha fechada, discutindo sistemas SISO e MIMO e levando ainda em consideração fatores importantes como o tempo morto e fase não-mínima. Outras formulações para colocação de pólos também são utilizadas, como mostraram SYRMOS et al. (1997) analisando analítica e computacionalmente os métodos e mostrando o conhecimento adquirido em décadas de pesquisas.

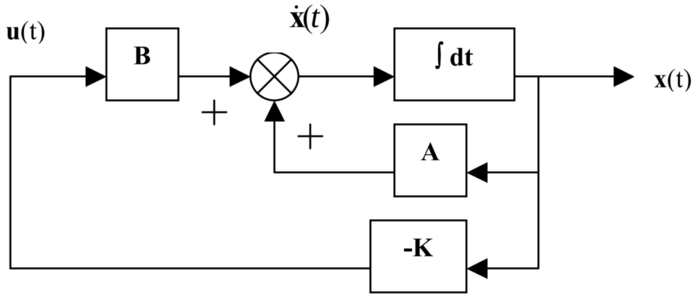


Figura 2.3 – Sistema de controle em malha fechada com **u** = **-Kx.**

2.4.2 Controle Ótimo

O controle pode ser considerado como a manipulação a fim de se alcançar um determinado objetivo, incluindo a transferência de estados para regiões desejadas e a supressão de perturbações. Quando mais de um simples controle é feito, incluindo o atendimento a minimização de algum critério, levando em consideração alguns parâmetros que constituirão as restrições em algum sentido, este controle é chamado de controle ótimo, como mostrou FURUTA (1988). Logo o controle ótimo está associado a índices de desempenho. Vários autores mostram que índices quadráticos, como por exemplo, o mostrado na Eq. 2.5 onde L(**x**,**u**) que é uma função quadrática, hermitiana de **x** e **u**, fornecerão leis de controle lineares na forma da Eq. 2.3.

$$J = \int_0^\infty L(\mathbf{x}, \mathbf{u})dt \tag{2.5}$$

O índice de desempenho mostrado na Eq. 2.6 é bastante utilizado como mostrou OGATA (1987), onde **Q** é uma matriz positiva definida ou positiva semidefinida hermitiana, **R** é uma matriz positiva definida hermitiana e **u** não sofre restrições. Uma das vantagens de índices quadráticos é que matematicamente ele dá maior importância a desvios maiores, despreza os efeitos de pequenos .

$$J = \int_0^\infty \left[\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{u}\right]dt \tag{2.6}$$

Como mostrou GOMES (1987), a parcela $\mathbf{x}^{T}\mathbf{Q}\mathbf{x}$ garante a lei de transferência de um determinado estado $\mathbf{x}_1$ a um novo estado $\mathbf{x}_f$ na condição mínima ponderável e a parcela $\mathbf{u}^{T}\mathbf{R}\mathbf{u}$, define as entradas de energia que garantem a transferência do estado $\mathbf{x}_1$ para $\mathbf{x}_f$. Sistemas com sinal de entrada dado por índices de desempenho podem ser resolvidos diretamente pelo segundo método de Lyapunov e também utilizando o princípio das máximas de Pontryagin que prevê a formação da matriz denominada de 'Hamiltoniano', segundo os princípios do cálculo variacional como mostrou D'AZZO e HOUPIS (1981). Aqui se incorpora o segundo método de Lyapunov. Uma manipulação algébrica permite que se obtenha a forma da equação matricial de Riccati, mostrada na Eq. 2. 7 e cuja solução resulta na lei de controle mostrada na Eq. 2. 8.

$$\mathbf{A}^{T}\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^{T}\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \tag{2.7}$$

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^{T}\mathbf{P}\mathbf{x}(t) \tag{2.8}$$

SARGENT (2000) mostrou uma breve revisão histórica sobre os conceitos que envolvem a teoria de controle, formulando-a e explorando questões ligadas ao aspecto computacional com técnicas ligadas a solução numérica principalmente para sistemas não-lineares.

2.4.3 Observadores de Estado

A lei de controle expressa na Eq. 2.3 exige que todos os estados sejam medidos e assim estejam disponíveis para a realimentação. Na prática, entretanto, nem todas as variáveis de estado estão disponíveis para realimentação, sendo necessário estimar os estados não disponíveis. Esta estimativa de estado não mensurável é chamada de observação. Se o observador estima todas as variáveis de estados do sistema ele é chamado de observador de estado de ordem plena. Existem casos em que apenas alguns estados necessitam ser estimados e, neste caso, tem-se o observador de ordem mínima quando ele estima somente o conjunto de variáveis mínimo necessário, ou o observador de ordem reduzida quando além do conjunto mínimo ele estimar algum outro estado que seja medido, mas que por ruído, perturbação ou custo não foi contemplado.

Segundo OGATA (1993) um observador de estado estima variáveis de estado baseadas nas medidas das variáveis de saída e de controle. O conceito de observabilidade é de fundamental importância, uma vez que o observador de estado poderá ser projetado se e

somente se a condição de observabilidade for satisfeita. Uma vez que sistemas onde a entrada **u** altera diretamente as saídas **y** não são representativos da realidade dos processos, considerou-se a saída do sistema como mostrado na Eq. 2.2 com **D** = **0**. A Eq. 2.9 mostra a equação para o observador de estado de ordem plena onde $\tilde{\mathbf{x}}$ é o vetor de estados estimados e $\mathbf{K_e}$ é a matriz de ganho do observador. A Figura 2.4 mostra o diagrama de blocos para sistemas com observadores de estado de ordem plena.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{K}_e(\mathbf{y} - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}) \tag{2.9}$$

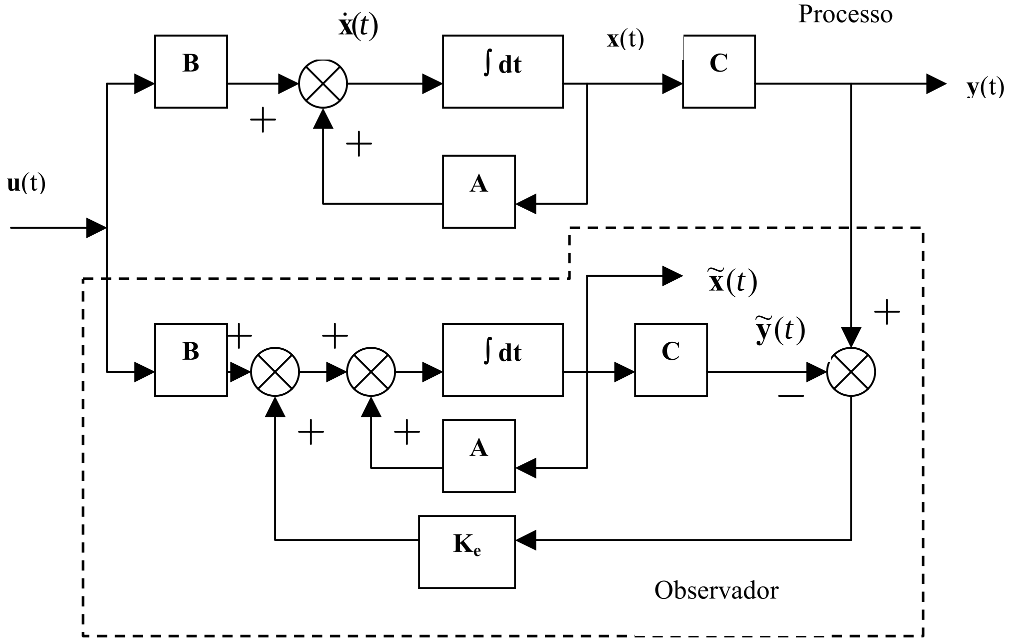


Figura 2.4 – Diagrama de blocos do sistema com observador de estado de ordem plena.

Utilizando-se dos mesmos métodos de projeto para a matriz de realimentação de estado é possível encontrar a matriz $\mathbf{K_e}$ mostrada na Eq. 2.10, onde a matriz $\left[\mathbf{C}^T \;\; \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T \;\; ... \;\; (\mathbf{A}^T)^{n-1}\mathbf{C}^T\right]^{-1}$ é a matriz de observabilidade de estados completa e $\mathbf{\Theta}$ é a equação característica do sistema.

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{\Theta}(\mathbf{A})\left(\left[\mathbf{C} \quad \mathbf{CA} \quad ... \quad \mathbf{C}(\mathbf{A})^{n-1}\right]^{-1}\right)^T \left[0 \quad ... \quad 0 \quad 1\right]^T \tag{2.10}$$

Com a utilização de observadores de estado, os pólos da malha fechada do sistema de controle consistem nos pólos devido à realimentação de estado mais os pólos devido ao observador. A equação característica para este sistema é mostrada na Eq. 2.11.

$$\left|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}\right|\left|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{K}_e\mathbf{C}\right| = 0 \tag{2.11}$$

Os pólos da malha fechada a serem gerados pela realimentação de estado são escolhidos de tal maneira que o sistema satisfaça os requisitos de desempenho. Os pólos do observador são usualmente escolhidos de modo que a resposta do observador seja muito mais rápida do que a resposta do sistema.

2.5 Solução Completa da Equação de Estado.

Considerando-se a Eq. 2.1 para o caso de excitação na entrada **u**(t)=**0**, a equação de estado é denominada de equação de estado homogêneo e é mostrada na Eq. 2.12. A solução desta equação diferencial é mostrada na Eq. 2.13 para a condição t=0.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \tag{2.12}$$

$$\mathbf{x}(t) = e^{(\mathbf{A}t)}\mathbf{x}(0) = \boldsymbol{\gamma}(t)\mathbf{x}(0) \tag{2.13}$$

Onde o termo $e^{(\mathbf{A}t)}$ ou matriz exponencial é denominado de matriz de transição dos estados, $\boldsymbol{\gamma}(t)$, e pode ser expresso em série de potências como mostra a Eq. 2.14.

$$e^{(\mathbf{A}t)} = \mathbf{I} + \frac{\mathbf{A}t}{1!} + \frac{(\mathbf{A}t)^2}{2!} + \ldots + \frac{(\mathbf{A}t)^n}{n!} + \ldots \tag{2.14}$$

Considerando-se o caso onde a excitação de entrada **u**(t) é diferente de zero a solução completa é obtida a partir da Eq. 2.1, como mostra a Eq. 2.15 a. Resolvendo-se a integral obtém-se a Eq. 2.15 b. A dedução completa para se obter a equação Eq. 2.15 b encontra-se no ANEXO A.

$$\mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\gamma}(t - t_o)\mathbf{x}(t_o) + \int_{t_o}^{t} \gamma(t - \upsilon)\mathbf{B}\mathbf{u}(\upsilon)d\upsilon \tag{2.15 a}$$

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}t}\mathbf{x}(t_o) + \mathbf{A}^{-1}\left(e^{\mathbf{A}t} - \mathbf{I}\right)\mathbf{B}\mathbf{u}(t) \tag{2.15 b}$$

2.6 Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)

2.6.1 Histórico

O caminho mais eficiente para se obter bons lucros das plantas industriais, frente às variações de mercado, com um mínimo investimento é oferecido pela integração de todos os aspectos de automação e do processo decisório, como apresentou GARCIA e PRETT (1986) e PRETT e GARCIA (1989) apud GARCIA et al.(1989). Torna-se essencial para o sucesso do controle do processo que o mesmo satisfaça a todos os objetivos econômicos. Como resultado, para alcançar as metas propostas, o sistema de controle deve antecipar violações das restrições e promover a correção necessária. A aplicação de controladores usando a teoria de MPC vem de encontro à obtenção destes resultados desejados. Estudos desta área apareceram ainda no início da década de 1960, com a proposta de um horizonte de movimentos, que se trata do centro de todos os algoritmos de MPC. Porém o interesse em aplicações industriais usando o MPC situa-se apenas no início da década de 1970. Em 1978, RICHARD et al. apud GARCIA (1989) descreveu com sucesso aplicações de MPC na forma de MAC (*Model Algoritmic Control*). Em 1979, engenheiros da Shell esboçaram a DMC (*Dynamic Matrix Control* – Cutler; Ramaker,1979; Prett e Gillette,1979) e relataram aplicações para o processamento de petróleo. Em ambos os algoritmos um modelo dinâmico explícito da planta foi usado para prever efeitos de ações futuras das variáveis manipuladas nas saídas. Os movimentos futuros das variáveis manipuladas são determinados por otimização com o objetivo de minimizar os erros de predição sujeitos às restrições de operação. A otimização é repetida a cada instante de amostragem baseada na atualização dos dados de medidas da planta. O problema de MPC é formulado como um problema dinâmico de otimização. Desde 1978 ocorreu uma popularização deste controlador, principalmente em indústrias ligadas a processos químicos. Em 1985 Morshedi usa uma função objetivo linear e incorpora restrições explícitas gerando o algoritmo LDMC (*Linear Dynamic Matrix Control*). Em 1986 GARCIA e MORSHEDI (1986) discutem uma extensão da formulação DMC incorporando uma função quadrática e restrições chamando-o de QDMC (*Quadratic Dynamic Matrix Control*). GARCIA (1989) relatou inúmeras aplicações.

Muitas companhias têm oferecido *software* de MPC. A maioria das aplicações são multivariáveis e envolvem restrições caracterizando-se neste tipo de problema a maior motivação para desenvolvimento de técnicas de controle MPC. Muitos foram os algoritmos

desenvolvidos, com diferentes filosofias de forma a melhor atender aos processos a que eles se propunham controlar, dos quais citam-se: controle adaptativo, controle preditivo, algoritmo de controle preditivo generalizado, controle de otimização multivariável e outros, como apresentou MUSKE e RAWLINGS (1993 b). Tem sido desenvolvidos algoritmos robustos e eficientes, o que é essencial para operação *on-line*. Em muitos casos tem sido utilizadas regras heurísticas juntamente com justificativas teóricas como sugeriu MUSKE e RAWLINGS (1993).

Embora aplicações de algoritmos lineares de MPC satisfaçam no controle de processos lineares e moderadamente não lineares, a degradação da performance e a instabilidade podem freqüentemente ocorrer diante de não-linearidades fortes. Computadores de alta velocidade de processamento forneceram o incentivo para desenvolvimento de algoritmos que utilizassem modelos de processos não-lineares, resultando em um crescimento do número de algoritmos que utilizavam modelos não-lineares na otimização *on-line*. A princípio para desenvolver técnicas de programação não-linear baseou-se em uma extensão do QDMC para processos não-lineares chamada NLQDMC (*NonLinear Quadratic Dynamic Matrix Control*) como foi apresentada por GATTU e ZAFIRIOU (1992).

Muito trabalho de pesquisa têm sido empregado a fim de desenvolver novos algoritmos e dominar características do processo que afetam o ajuste e desempenho do controlador e incorporando novos campos da ciência. Neste caso podem ser citados os seguintes trabalhos: LEE et al. (1995) que trata da eficiência computacional do MPC, usando de técnicas de condensação e que expressam a função objetivo e as restrições em bases *wavelet* de forma a alcançar a estabilidade desejada com simplicidade computacional; DOYLE et al (1995) que emprega modelo de Volterra como uma extensão não linear do modelo de convolução linear utilizado no MPC convencional. RICKER (1990) que trata do MPC com observadores de estado promovendo através de simples sintonia no estimador de estado uma performance robusta. LEE e RICKER (1994) estudaram a extensão do filtro de Kalman baseado no controle preditivo não-linear, com um aumento moderado da exigência computacional demonstrando potenciais benefícios para a aplicação desta técnica. LIU et al. (1998) que trata do uso de redes neuronais em algoritmos de controle preditivo em sistemas não-lineares. Estas redes têm se mostrado atrativas ferramentas na construção de modelos complexos. EATON e RAWLINGS (1991) que mostram a superioridade do MPC em processo que possuem fase não mínima, a obtenção da estabilidade em plantas instáveis e o controle de plantas não-lineares com múltiplos estados estacionários.

A idéia do MPC não é restrita a uma determinada descrição do sistema, mas a computação e implementação dependem da representação do modelo. Os seguintes modelos têm sido os mais usuais para a descrição do sistema: modelo degrau, modelo impulso e modelo em espaço de estados como mostrou GARCIA et al. (1989). O processo de discretização fará parte em alguma etapa do MPC, seja na formulação, seja na aplicação.

De maneira geral os diferentes algoritmos de MPC são formulados no instante presente k e considerando um horizonte p, como ilustra a Figura 2.5. Usando a resposta do modelo do processo a variações, as variáveis manipuladas são preditas. A ação da variável manipulada é selecionada de tal forma que a resposta predita possui certas características desejadas. Apenas a primeira ação é implementada e no instante k+1, é feita uma atualização das medidas da planta e feito um novo cálculo para as variáveis manipuladas e saídas no horizonte de predição, se algo ocorrer na planta, durante este intervalo, por exemplo um ruído ou uma perturbação, isto será detectado e antes que possa interferir na atividade da planta será implementada uma ação a fim de corrigir e manter a mesma sob controle.

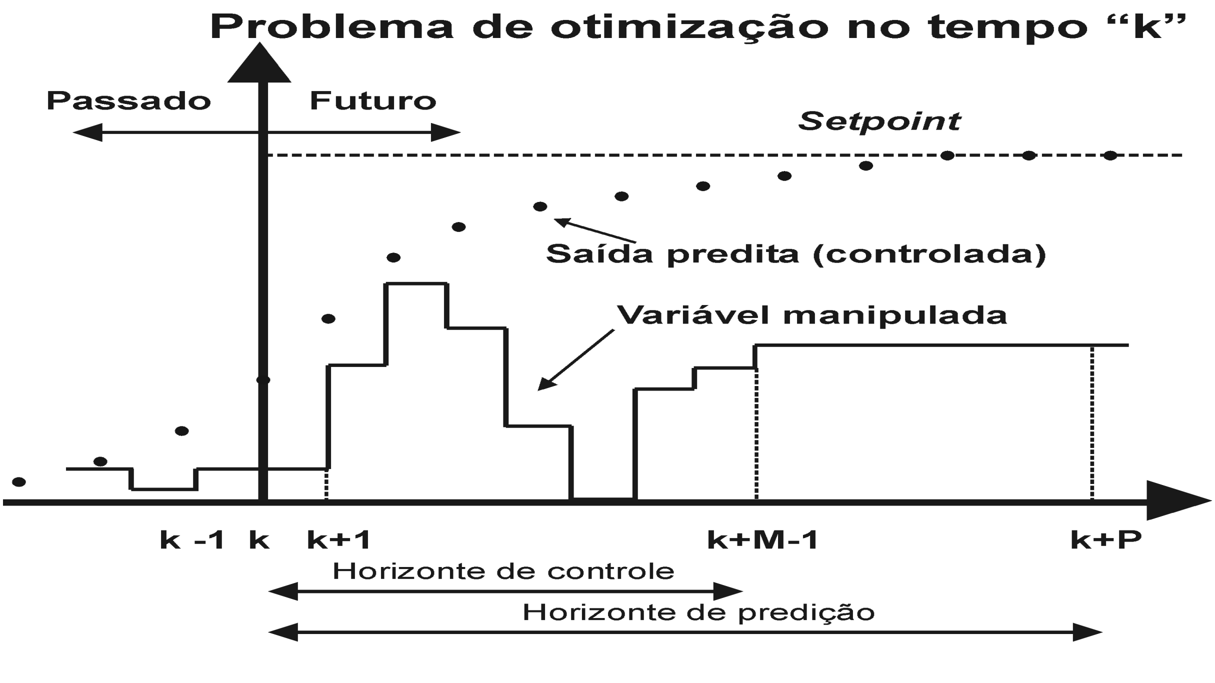


Figura 2.5: Horizonte de ações, centro da teoria de MPC.

2.6.2 Formulações Clássicas

DMC

Como apresentados por GARCIA e MORARI (1982) apud GARCIA e MORDEHEDI (1985) partindo de um modelo de entrada/saída linear e usando a forma discretizada obtém-se a Eq. 2.16.

$$\mathbf{y}(k+1)=\sum_{i=1}^{N}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-i+1)+\mathbf{y}_0+\mathbf{d}_{DMC}(k+1) \tag{2.16}$$

Onde k é o tempo de amostragem utilizado na discretização; $\mathbf{y}_0$ é vetor de condições iniciais das saídas; $\Delta\mathbf{u}(k)$ é a variação das entradas em diferentes intervalos de k; $\mathbf{y}(k)$ é o valor das variáveis controladas no instante k; $\mathbf{d}_{DMC}(k)$ são fatores não-medidos que afetam o comportamento de $\mathbf{y}(k)$; $\mathbf{a}_i$ é a matriz dos coeficientes da resposta do sistema ao degrau unitário e N é o número de intervalos para que o sistema estabeleça o novo estado estacionário. O objetivo do controlador é encontrar os movimentos das variáveis manipuladas, $\Delta\mathbf{u}(k)$, que deveria fazer com que as saídas atingissem da melhor forma os valores designados, $\mathbf{y}_s$, face às perturbações. Projetando as saídas para qualquer tempo futuro k + h, onde h > 0, obtém-se a Eq. 2.17

$$\mathbf{y}(k+h)=\sum_{i=1}^{h}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-h+i)+\mathbf{y}_0+\sum_{i=h+1}^{N}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-i+h)+\mathbf{d}_{DMC}(k+h) \tag{2.17}$$

Os termos do lado esquerdo da igualdade possuem o seguinte significado: efeito dos movimento futuros ($\sum_{i=1}^{h}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-h+i)$), efeitos de movimentos passados ($\mathbf{y}_0+\sum_{i=h+1}^{N}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-i+h)$) e efeitos de perturbação preditos ($\mathbf{d}_{DMC}(k+h)$). Por simplificação, define-se os efeitos dos movimentos passados na equação Eq. 2.18.

$$\mathbf{y}^*(k+h)=\mathbf{y}_0+\sum_{i=l+1}^{N}\mathbf{a}_i\Delta\mathbf{u}(k-i+h) \tag{2.18}$$

Utilizado as equações anteriores pode-se escrever a equação 2.18, considerando os intervalos de k+l até k+P e expressa um procedimento de projeção das saídas. P é o horizonte de predição e M é o número de movimentos de entrada.

$$\begin{bmatrix}\mathbf{y}(k+1)\\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+P)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{y}^*(k+1)\\ \vdots \\ \mathbf{y}^*(k+P)\end{bmatrix}+\mathbf{W}\begin{bmatrix}\Delta\mathbf{u}(k)\\ \vdots \\ \Delta\mathbf{u}(k+M-1)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{d}_{DMC}(k+1)\\ \vdots \\ \mathbf{d}_{DMC}(k+P)\end{bmatrix} \tag{2.19}$$

A matriz **W** é mostrada na equação Eq. 2.20.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \cdots & \mathbf{A}_{1s} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \cdots & \mathbf{A}_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{A}_{r1} & \mathbf{A}_{r2} & \cdots & \mathbf{A}_{rs} \end{bmatrix}. \tag{2.20}$$

Onde as matrizes $\mathbf{A}_{ij}$ são chamadas de matrizes dinâmicas e a equação 2.21 mostra sua constituição, onde r é a dimensão das saídas e s é a dimensão das entradas.

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{a}_M & \mathbf{a}_{M-1} & & \mathbf{a}_1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{a}_N & \mathbf{a}_{N-1} & & \mathbf{a}_{N-M+1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{a}_P & \mathbf{a}_{P-1} & \cdots & \mathbf{a}_{P-M+1} \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

Apenas M movimentos são calculados, logo $\Delta\mathbf{u}(k)=0$ para $k > M$. A experiência mostra que um ajuste estável para o controlador é o que obedece a equação 2.22.

$$P = N + M \tag{2.22}$$

Resolver este sistema encontrando os M movimentos de entrada futuros significa que a soma dos quadrados dos desvios entre a projeção de $\mathbf{y}(k+h)$ e a saída desejada $\mathbf{y}_s$ é minimizado como apresenta a equação Eq. 2.23.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_s - \mathbf{y}^*(k+1) - \mathbf{d}_{DMC}(k) \\ \vdots \\ \mathbf{y}_s - \mathbf{y}^*(k+P) - \mathbf{d}_{DMC}(k) \end{bmatrix} = \mathbf{e}_{DMC}(k+1) = \mathbf{W}\mathbf{U}(k) \tag{2.23}$$

Onde $\mathbf{U}(k)$ é o vetor de movimentos futuros e é apresentado na equação Eq. 2.24 e 2.25 e $\mathbf{e}_{DMC}(k+1)$ é o vetor de projeção dos desvios do valor desejado das saídas apresentadas na equação Eq. 2.26.

$$\mathbf{U}_n(k) = [\Delta\mathbf{u}(k) \ \cdots \ \Delta\mathbf{u}(k+M-1)]^T \tag{2.24}$$

$$\mathbf{U}(k) = \left[\mathbf{U}_1(k)^T \ \cdots \ \mathbf{U}_s(k)^T\right]^T \tag{2.25}$$

$$\mathbf{e}_{DMC}(k+1) = \left[\mathbf{e}_{DMC\,1}(k+1)^T \ \cdots \ \mathbf{e}_{DMC\,r}(k+1)^T\right]^T \tag{2.26}$$

A solução da equação 2.23 pelo método dos mínimos quadrados fornece a equação Eq. 2.27.

$$\mathbf{U}(k) = (\mathbf{W}^T\mathbf{W})^{-1}\mathbf{W}^T\mathbf{e}_{DMC}(k+1) \tag{2.27}$$

QDMC

GARCIA e MORDEHEDI (1985) mostraram esta formulação, sendo ela uma resolução QP da formulação DMC. Considerando que o sistema esteja sujeito a restrições, o controlador dever ser capaz de prescrever movimentos que mantenha as variáveis dentro dos limites. A projeção das restrições pode ser expressa matematicamente pelas equações Eq. 2.28 e Eq.2.29.

$$\mathbf{ZU}(k) \le \mathbf{z}_{QDMC}(k+1) \tag{2.28}$$

$$\mathbf{U}_{min} \le \mathbf{U}(k) \le \mathbf{U}_{max} \tag{2.29}$$

A solução da formulação DMC segundo o princípio dos mínimos quadrados pode ser expressa com a minimização quadrática mostrada na equação Eq. 2.30.

$$\min J = \frac{1}{2}\left[\mathbf{WU}(k) - \mathbf{e}_{DMC}(k+1)\right]^T \mathbf{\Xi}^T \mathbf{\Xi}\left[\mathbf{WU}(k) - \mathbf{e}_{DMC}(k+1)\right] + \frac{1}{2}\mathbf{U}(k)^T \mathbf{\Lambda}^T \mathbf{\Lambda U}(k) \tag{2.30}$$

Onde $\mathbf{\Xi}$ é a matriz de penalização para resíduos das variáveis controladas e $\mathbf{\Lambda}$ é a matriz de supressão e restrição de movimentos de entrada.

A partir das considerações acima, o problema QP pode ser formulado como mostra a equação Eq. 2.31. As restrições encontram-se nas equações Eq. 2.28 e Eq. 2.29. As matrizes $\mathbf{H_s}$ (matriz Hessiana) e $\mathbf{g}$ (vetor gradiente) encontram-se descritos nas equações Eq. 2.32 e Eq. 2.33.

$$\min J = \frac{1}{2}\mathbf{U}(k)^T \mathbf{H}_s{}^T \mathbf{U}(k) - \mathbf{g}(k+1)^T \mathbf{U}(k) \tag{2.31}$$

$$\mathbf{H_s} = \mathbf{W}^T \mathbf{\Xi}^T \mathbf{\Xi W} + \mathbf{\Lambda}^T \mathbf{\Lambda} \tag{2.32}$$

$$\mathbf{g}(k+1) = \mathbf{W}^T \mathbf{\Xi}^T \mathbf{\Xi e}_{DMC}(k+1) \tag{2.33}$$

2.6.3 Robustez com o controlador MPC

Como mostrou GARCIA (1989), para o problema sem restrição o controlador MPC equivale ao controle clássico em feedback e, portanto todas as técnicas de análise de robustez são aplicadas, lembrando que a robustez do controlador depende de como ele é projetado. A questão da quantidade de parâmetros envolvidos na modelagem e formulação do MPC também não influencia na robustez do mesmo. Por outro lado, não há dúvidas de que o

controlador MPC pode ser mais facilmente ajustado como um controlador robusto que o controle clássico.

O controle de processo necessita responder competitivamente com relação aos requisitos do mercado. O MPC é uma ferramenta atrativa para tratar as incertezas de modelo e conseguir uma operação em condições ótimas atendendo às restrições do processo.

2.7 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar de forma resumida um tema demasiadamente extenso como o de controle de processo. Foi traçada uma cronologia histórica que juntamente com a teoria básica fornecem um panorama do controle, seus paradigmas e perspectivas, ressaltando os pontos de maior relevância para o desenvolvimento da área. Desta forma espera-se que mesmo o leitor sem muita afinidade com esta área, possa, a partir de agora, ler e entender os assuntos abordados nos capítulos subseqüentes.

CAPÍTULO 3

3. PROCESSO: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

3.1 Introdução

Alguns conceitos de eletricidade já eram conhecidos na antiguidade pelos gregos, mas somente muitos séculos depois é que o tema passou a ser alvo de estudos. Muitos foram os cientistas que deixaram na teoria da eletricidade a sua contribuição. William Gilbert foi o primeiro a estudar sistematicamente a eletricidade e o magnetismo. No século XVIII, Charles François de Cisternay Du Fay e Benjamin Franklin distinguiram os dois tipos de carga. No final do século XVIII, importantes descobrimentos no estudo das cargas estacionárias foram conseguidos com os trabalhos de Joseph Priestley, Lord Henry Cavendish, Charles-Augustin de Coulomb e Siméon-Denis Poisson. Em 1800, o conde Alessandro Volta inventou a pilha elétrica, ou bateria, logo transformada por outros pesquisadores em fonte de corrente elétrica de aplicação prática. Em 1820, André-Marie Ampère demonstrou as relações entre correntes paralelas e, em 1831, Michael Faraday fez descobertas que levaram ao desenvolvimento do dínamo, do motor elétrico e do transformador. As pesquisas sobre o poder dos materiais de conduzir energia estática, iniciadas por Cavendish em 1775, foram aprofundadas na Alemanha pelo físico Georg Simon Ohm. Publicada em 1827, a lei de Ohm até hoje orienta o desenho de projetos elétricos. James Clerk Maxwell encerrou um ciclo da história da eletricidade ao formular as equações que unificam a descrição dos comportamentos elétrico e magnético da matéria. O aproveitamento dos novos conhecimentos na indústria e na vida cotidiana se iniciou no fim do século XIX. Em 1873, o cientista belga Zénobe Gramme demonstrou que a eletricidade pode ser transmitida de um ponto a outro através de cabos condutores aéreos. Em 1879, o americano Thomas Edison inventou a lâmpada incandescente e, dois anos depois, construiu, na cidade de Nova York, a primeira central de energia elétrica com sistema de distribuição.

3.2 Panorama Histórico da Energia Elétrica no Brasil

O CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL (CMEB - 1988) apresentou um relato histórico da energia elétrica no Brasil, cujos principais pontos são destacados a seguir, juntamente com fatos recentes e relevantes para o sistema elétrico:

- 1879 – Dom Pedro II concede a Thomas Edison o privilégio de introduzir no país aparelhos e processos destinados à utilização da luz elétrica.
- 1879 – inauguração da iluminação elétrica na Estação Central da Estrada de Ferro Dom Pedro II (atual Central do Brasil) no Rio de Janeiro, primeira instalação desse tipo em caráter permanente no país.
- 1881 – primeira demonstração pública de iluminação elétrica realizada no prédio do Ministério da Agricultura situado no Largo do Paço (atual praça XV de Novembro), no Rio de Janeiro.
- 1883 – inauguração, na cidade de Campos, província do Rio de Janeiro, do primeiro serviço público de iluminação elétrica do Brasil e da América do Sul.
- 1883 - Entrada em operação da primeira usina hidrelétrica do país, a usina hidrelétrica Ribeirão do Inferno, em Minas Gerais.
- 1889 – a Companhia Mineira de Eletricidade – CME, fundada no ano anterior, inaugura a usina hidrelétrica Marmelos-Zero, a primeira de grande porte do país, em Juiz de Fora – MG, com potência instalada de 3996 KW.
- 1901 – entrada em operação da usina hidrelétrica Parnaíba (atual Edgard de Souza) pertencente a São Paulo Light, primeira a utilizar barragem com mais de 15 metros de altura.
- 1907 – entrada em operação da usina hidrelétrica Fontes, pertencente a Rio Light, na época a maior do país e uma das maiores do mundo.
- 1913 – entrada em operação da usina hidrelétrica Pedra (atual Delmiro Gouveia), pertencente à Companhia Agro-Fabril Mercantil, primeira a aproveitar o potencial hidráulico da cachoeira de Paulo Afonso, no rio São Francisco.
- 1921 – inaugurada pela empresa *General Electric*, na cidade do Rio de Janeiro, a primeira fábrica de lâmpadas do país.
- 1952 – criação das Centrais Elétricas de Minas Gerais – Cemig, atualmente denominada Companhia Energética de Minas Gerais S/A – Cemig.

- 1960 – criação do Ministério das Minas e Energia – MME.
- 1961 – criação das Centrais Elétricas Brasileiras S/A – Eletrobrás, constituída em 1962 para coordenar técnica, financeira e administrativamente o setor de energia elétrica do Brasil.
- 1962 – entrada em operação da usina hidrelétrica de Três Marias, pertencente a Centrais Elétricas de Minas Gerais S/A – Cemig e primeira a ser utilizada para a regularização do Rio São Francisco, com potência instalada de 396000 KW.
- 1963 – entrada em operação da maior usina do Brasil na época de sua construção, a usina hidrelétrica de Furnas, pertencente a Central Elétrica de Furnas – Furnas.
- 1965 – criação sob a sigla DNAE, do Departamento Nacional de Águas e Energia, transformado, em 1969, em Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE.
- 1965 - Adoção do plano nacional de unificação de freqüência em 60 Hz, de acordo com a recomendação do Conselho Nacional das Águas e Energia Elétrica – CNAEE.
- 1986 – entrada em operação do sistema interligado Sul-Sudeste, o mais extenso da América do Sul.
- 1986 – publicação do primeiro Plano Diretor para a Conservação e Recuperação do Meio Ambiente nas obras e serviços do setor elétrico.

Como mostrou o OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS - 1999):

- 1996 – criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) conforme reestruturação do setor energético.
- 1998 – criado o Operador Nacional do Sistema (ONS) com os objetivos de planejar, programar, supervisionar, coordenar e controlar a operação do sistema elétrico brasileiro.

Em 2001 foi criado o Ministério de Gestão da Crise de Energia.

A reestruturação do setor elétrico brasileiro, iniciada nos anos 90, teve como principais objetivos aumentar a competição setorial, reduzir preços, aumentar a qualidade e a confiabilidade do sistema, bem como atrair capitais de forma a viabilizar a sua expansão.

A implementação de novos projetos de PCH's, bem como reativação e modernização de usinas existentes, poderiam contribuir para o encaminhamento da atual crise que culminou com o racionamento de energia elétrica.

3.3 Sistemas Elétricos de Potência

O processo de geração de energia elétrica é constituído pelas etapas de: geração, transmissão e distribuição. O objetivo deste processo é gerar energia elétrica em quantidade suficiente e nos locais mais apropriados, transmiti-la em grande quantidade aos centros de carga e então distribuí-la aos consumidores individuais, em forma e qualidade apropriada e com o menor custo ecológico e econômico possível, como mostrou ELGERD (1976).

As principais fontes de energia são a hidrelétrica, a termelétrica e a nuclear, mas novas fontes vem sendo pesquisadas, com grande potencial para aplicação em grande escala à medida que a tecnologia torna tais empreendimentos economicamente viáveis.

O sistema elétrico de potência é constituído basicamente dos seguintes componentes: máquina síncrona, regulador de velocidade, regulador de tensão e excitação, turbina e seus componentes, linha de transmissão e carga. Estes elementos apresentam características próprias e sua associação determina o comportamento do sistema que constituem, como sugeriu GOMES (1985).

Por razões econômicas e tecnológicas a maioria dos sistemas está interligada em grupos regionais, que operam técnica e economicamente independentes, mas ligados a certas características de geração e planejamento. A necessidade de associação do desempenho ao parâmetro confiabilidade é de tão grande relevância que existe um compromisso contratual assumido entre as concessionárias de energia elétrica que menciona o cumprimento de tarefas específicas, reforçando a importância econômica exercida e a estratégia da operação interligada.

O projeto dos sistemas de energia deve atender a critérios mínimos com relação à: capacidade de transmissão de energia, economicidade e qualidade de transmissão, que se entende por freqüência e tensão constantes e alta confiabilidade na entrega. O sistema deve estar apto a fornecer potência ativa e potência reativa de acordo com a demanda variável ditada pelo consumidor. Estes objetivos são afetados por fatores tais como: estrutura do sistema, capacidade de transmissão e características das cargas.

Como mostrou SOUZA (1983), muito embora as cargas individuais possam ser de caráter inteiramente aleatório, uma certa configuração média pode ser vista a partir dos transformadores de distribuição apresentando uma configuração praticamente previsível. A variação destas cargas ao longo do tempo é também previsível (horas do dia, semana, domingos, feriados e estações do ano). Esta variação ao longo do tempo é lenta e possui grande influência no comportamento dos sistemas de regulação da máquina. A fim de possibilitar um planejamento energético, ao longo do tempo e de acordo com um histórico da demanda, foram confeccionados diagramas de potência em função do tempo, os chamados diagramas de carga. O diagrama de carga básico é o diário, levantado para um período de 24 horas. A Figura 3.1 mostra um diagrama de carga consolidado para determinado período.

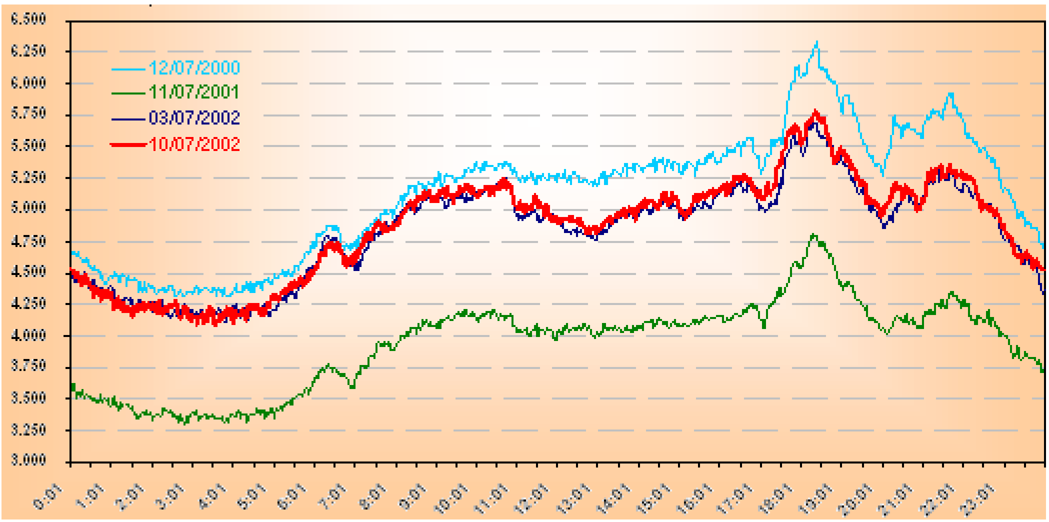


Figura 3.1 – Diagrama de carga verificado em um período para um bloco de geração- Tempo (h) x Potência (MW).

Depois de executado o paralelo, a máquina já como parte integrante do sistema, deve ser operada de maneira a fornecer, na medida do possível, o que for solicitado pelo sistema e cumprir com as condições básicas de operação. Isto implica que as condições de temperatura no rotor e no estator do gerador devem estar dentro dos limites admissíveis, a potência mecânica no eixo deve ser inferior ou igual à potência hidráulica da turbina e o ângulo entre o rotor e o campo de reação da armadura (δ) tem de estar dentro do limite de estabilidade, não só o teórico (estabilidade estática), mas também do prático (estabilidade dinâmica). A Figura 3.2 mostra uma curva de capacidade ou capabilidade genérica para um conjunto gerador síncrono.

A freqüência do sistema está intimamente relacionada com o balanço de potência ativa na rede inteira. Sob condições normais de funcionamento os geradores operam em

sincronismo, o que representa o funcionamento estável, e juntos geram a potência que a cada instante está sendo consumida por todas as cargas, já consideradas as perdas de transmissão. Variações incomuns na freqüência são indicações de que existe algo de errado. Nos sistemas modernos as variações permissíveis estão na ordem de 0.05 Hz. Logo a produção deve ser igual ao consumo. É bastante comum e prático se trabalhar, dentro da Engenharia Elétrica, com a técnica do modelo em "por unidade", método que visa tornar percentuais todas as variáveis do processo em relação a uma base de valores assim como pode ser visto e demonstrado por ELGERD (1976). Esse método também é conhecido como transformação PU.

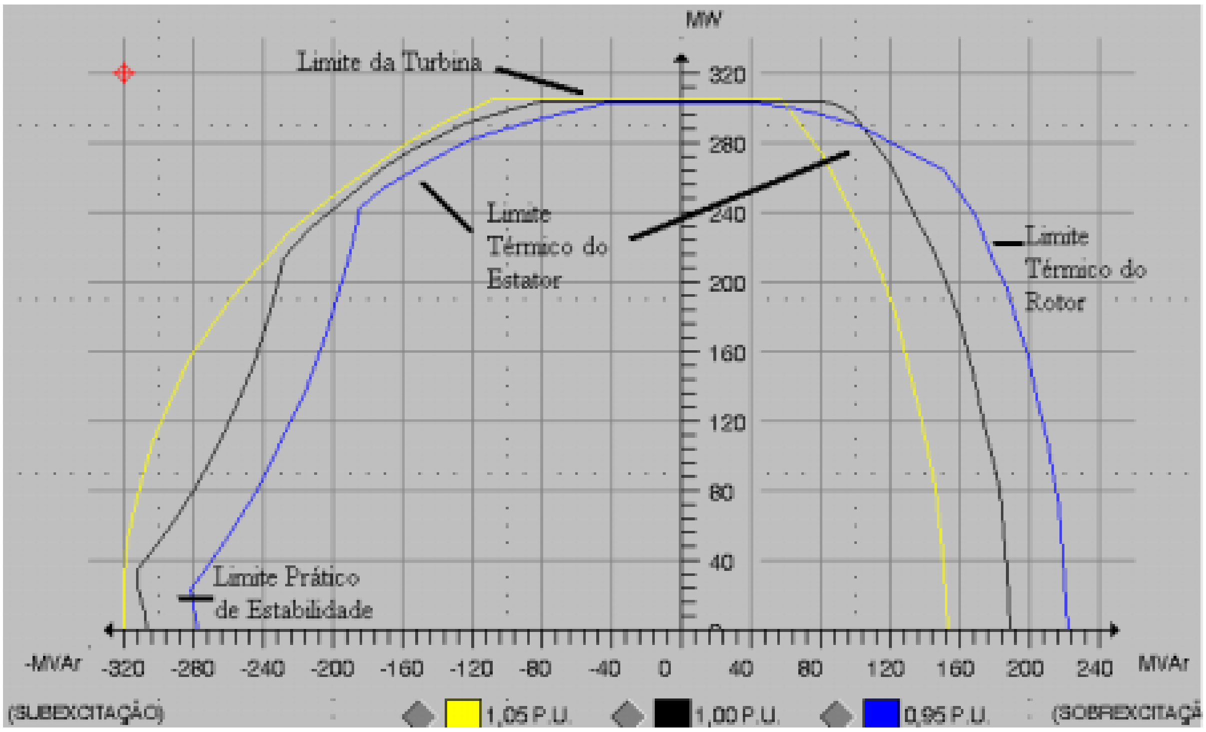


Figura 3.2 – Curva de Capabilidade para um conjunto gerador síncrono.

Uma vez que a máquina esteja sincronizada ao sistema as forças eletromecânicas tendem a mantê-la girando na mesma velocidade elétrica do resto da rede. Com a velocidade elétrica do gerador amarrada ao resto da rede pode-se atuar de forma a controlar a geração de potência ativa, controlando o conjugado aplicado ao gerador, pela máquina motriz, trabalho realizado pelo regulador de velocidade. Como as flutuações são aleatórias é impossível conseguir um perfeito equilíbrio entre a geração e a demanda, havendo então sempre um excesso ou deficiência na geração, e esse constante desequilíbrio causará flutuações na freqüência, que dentro de certos limites são considerados normais ou próprios do processo.

Nos reguladores de velocidade importantes parâmetros reúnem as principais características da regulação da turbina hidráulica. Considerando-se um regulador de velocidade típico o estatismo permanente representa a lei da variação da freqüência ($\Delta\omega$) em relação à correspondente variação de carga ou potência consumida (ΔP) e leva a uma queda permanente da freqüência de 5%, conforme determina o ONS (1999), como mostra a Eq. 3.1.

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta Pot} = -bp \tag{3.1}$$

O estatismo transitório está associado ao bloco de realimentação transitória e visa introduzir no sistema regulador um sinal compensador do efeito provocado pela ação das inércias hidráulicas e mecânicas, como apresentou GOMES (1985). As funções do regulador de velocidade vão além de manter a freqüência em um valor determinado, ele atua também na regulação e no controle da potência ativa através de atuação sobre o órgão motriz. As operações de limitação de carga versus velocidade, a repartição de carga entre geradores síncronos operando em paralelo, além do estabelecimento de condições de partida e parada também são outras importantes funções do regulador de velocidade como mostrou GOMES (1985). Analisando um regulador de velocidade de uma máquina síncrona operando em rede isolada podemos perceber características relevantes que também se apresentam para a operação em rede interligada. Imaginemos um sistema bem simples formado por uma máquina síncrona alimentando uma determinada carga através de uma linha de transmissão. Imaginemos também que este pequeno sistema seja dotado de um regulador de velocidade típico no qual encontram-se embutidos os parâmetros de estatismo permanente e estatismo transitório.

Havendo alteração na carga, o que pode ser caracterizado por um aumento ou diminuição da mesma, o sistema se deslocará para um novo estado de equilíbrio, o que acontecerá para um determinado valor da freqüência elétrica diferente daquele valor inicial. Considerando o sistema estável nesta operação, o déficit existente entre a potência gerada pela máquina e a potência resistente da carga não será suprido pelo controlador automático. Neste caso será necessário que algum dispositivo extra seja incorporado ao conjunto de controle automático de modo a suplementar o controle inicial. Estabelece-se aqui uma divisão no estudo da regulação: regulação primária associada com a regulação promovida pelo regulador automático de velocidade que corrige os pequenos distúrbios inerentes ao controle da velocidade e que será o alvo de estudo deste trabalho; e o controle suplementar associado ao controle secundário que é o agente responsável pelas operações de tomada e retirada de carga

e na promoção do anulamento do erro de velocidade gerado pela entrada de carga como apresentou GOMES (1985). A Figura 3.3 ilustra estas características da regulação em regime permanente. A variação de carga ΔP provocou uma correspondente variação na freqüência Δω gerando um erro neste sinal. A correção deste erro só será possível quando, a partir do ponto 1 do gráfico, se atingir o ponto 2. Percebe-se que se mudou de ponto ao mesmo tempo em que se mudou de curva. Essa ação é que é chamada de regulação secundária e somente poderá ser efetuada automaticamente a partir de um controle suplementar que normalmente se trata de um bloco PI (proporcional-integral) agindo sobre o sinal de erro de freqüência resultante, por exemplo. Uma outra maneira de implementação seria a ação manual do operador sobre o valor de referência, mas está não seria automática.

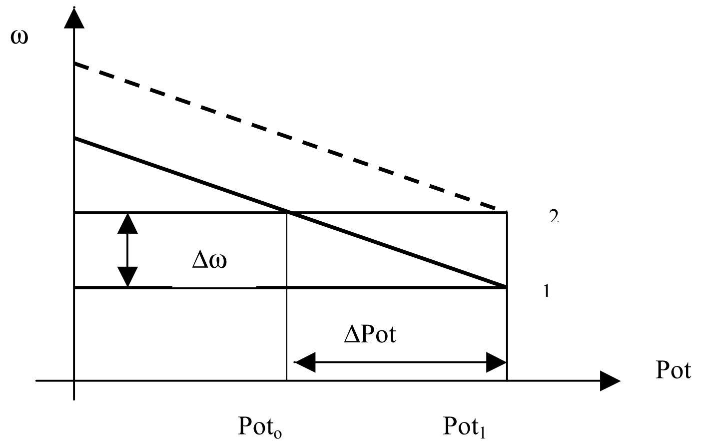


Figura 3.3 – Características da ação da regulação secundária da turbina.

O controle suplementar pode ser realizado de maneira manual ou automática, podendo ainda ser executado por uma estação remota, via microondas ou onda portadora via linha física (*carrier*). Este controle responde com uma ação de efeito integral sobre o somatório dos erros de potência na linha e de freqüência do sistema. Existem três tipos de controle suplementar: TLB (*Tie-Line-Bias*), FTL (*Flat-Tie-Line*) e FF (*Flat-Frequency*).

Analogamente à freqüência, um perfil constante de tensão de barra garantirá que o equilíbrio esteja sendo mantido entre a potência reativa produzida e potência reativa consumida. Deve-se controlar a tensão terminal, uma vez que os equipamentos são projetados para operação sob determinado valor de tensão nominal. O controle da tensão terminal é feito pelo regulador de tensão que atua na corrente de excitação, alterando a força eletromotriz gerada pela máquina. Os limites para o controle de tensão não necessitam ser tão estreitos quanto para a freqüência, porém são estipulados por uma norma, limites admissíveis tanto de

sobretensão quantos de subtensão sustentados. Isto tem a ver com a vida útil dos equipamentos.

No passado, muitas das técnicas de controle tiveram seu estudo e desenvolvimento aplicado a sistemas de potência que vem absorvendo ao longo do tempo novas tecnologias.

Instalações recentes já utilizam formulação em espaço de estados com estratégias de controle avançadas. Como apresentou KAWAI et al. (1999), desde 1968 unidades de produção de energia elétrica, principalmente termelétricas, tem sido automatizadas utilizando-se computadores, quando foram desenvolvidos os primeiros sistemas DDC (*Direct-Digital-Control*) e os sistemas foram colocados em operação com sucesso. Estes sistemas ajudam os usuário a reduzir o número de operações na unidade, contribuindo para a proteção do equipamento fazendo o trabalho dentro de seu limite, promovendo a partida e parada automática do sistema, regulando a máquina de forma a obter uma alta confiabilidade associada à função de interface com o usuário a fim de mostrar diagnósticos de operação.A tendência futura para desenvolvimento de informações e controles das unidades indica o desenvolvimento de configurações, sensores e atuadores que incorporem inteligência artificial e onde possam ser aplicados a teoria de otimização e o desenvolvimento de sistemas operados e mantidos aplicando-se algoritmos de controle avançados como, por exemplo, o controle de processos baseados em modelos. Como apresentou NANAYKKARA (1997) técnicas de controle preditivo foram utilizadas no controle de turbina eólica em uma pequena central de energia em um sistema de baixa inércia a fim de incorporar os efeitos da velocidade do vento e do sistema de potência, buscando uma otimização na produção de energia. Utilizou-se também *Gain-scheduling* para compensar características não-lineares da turbina e o uso de restrições com relação à oscilação de freqüência. Como apresentou WANG e SWIFT et al. (1996), tem sido extensivamente pesquisado o controle adaptativo para geradores de sistema de potência buscando um melhor comportamento dinâmico. Muitos destes controladores são basicamente reguladores auto-ajustáveis que assumem que o sistema de potência pode ser modelado por um sistema de baixa ordem linearizado por modelo ARMA (*AutoRegressive Moving Average Models*), cuja variação de parâmetros incluem as não linearidades do sistema de potência e mantêm a estabilidade usando esquemas de controle adaptativo, com mínima variância e deslocamento de pólos. Para aumentar a robustez do sistema utiliza-se da variação de condições operacionais e configuração do sistema. Estas técnicas são utilizadas em reguladores de velocidade e também em estabilizadores, os chamados estabilizadores do sistema de potência aplicados via regulador de tensão.

Algoritmos de controle automático robusto de geração têm sido desenvolvidos, sobretudo nas últimas duas décadas com objetivos de melhor performance a fim de atender os requisitos de confiabilidade com qualidade para o sistema elétrico. Suas principais características são: encontrar um controlador que consiga manter a estabilidade e uma ótima característica dinâmica quando de variação de parâmetros do sistema pela localização dos autovalores do laço fechado considerando-se uma mínima sensitividade. Isto é obtido adotando um algoritmo de colocação de pólos simples e efetivo juntamente com a otimização de parâmetros, como apresentou AZZAM (1999).

Avançados controles eletromecânicos também têm sido desenvolvidos. Já existem controladores que incorporam técnicas de auto-ajuste com controle automático simultâneo de regulação de tensão e regulação de velocidade. Eles são constituídos por sistemas claramente de alta não-linearidade, que levam em consideração a realização prática para a proposta de algoritmo. Notam-se a velocidade de processamento e a robustez apresentada, como mostrou SWIDENBANK et al. (1999).

Outra técnica bem aceita é a utilização de sistemas digitais cada vez mais comuns e potentes aplicados a sistemas de potência. TRIPATHY (1998) sugeriu uma metodologia para projeto e construção de reguladores de velocidade digitais como um importante passo para a integração do sistema para o controle *on-line*, mostrando resultados com características favoráveis aos sistemas digitais.

Como sugeriu FASOL (1997) é de grande importância à simulação de unidades de produção de energia elétrica a fim de prever o comportamento dinâmico e projetar algoritmos de controle investigando problemas operativos, principalmente com o objetivo de modernizar unidades de produção antigas, como a troca de controladores mecânicos por controladores digitais, buscando a atualização da tecnologia e da ciência aplicada, levando a um melhor rendimento e conseqüentemente a um maior lucro, qualidade e confiabilidade. Técnicas como a estabilização por projeto de controlador baseado no local das raízes, apesar de desenvolvido em 1940, ainda possuem grande aplicação.

Até mesmo técnicas como controle *fuzzy* e neurocontroladores já possuem amplo estudo em redes de sistemas de potência.

Os modelos representativos dos sistemas de regulação de velocidade e potência e de regulação de tensão são teoricamente genéricos, assim como os demais sistemas físicos caracterizados por máquinas síncronas, linhas de transmissão e cargas acopladas como sugeriu GOMES (1987).

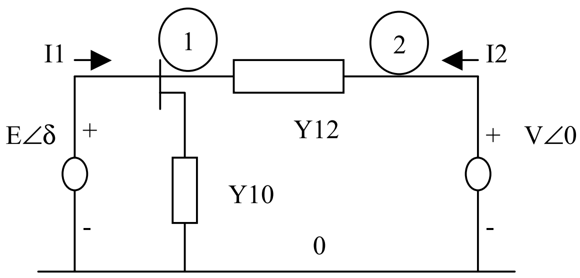


Figura 3.4 – Circuito para máquina contra barra infinita.

A escolha pela representação de uma instalação hidráulica geradora (E) contra uma barra infinita (V), acopladas por uma linha de transmissão (Y12) como mostra a Figura 3.4 deve-se ao fato de os resultados serem bastante representativos daquilo que ocorre na realidade, no interior das estações, sem maiores preocupações com o sistema externo. Neste modelo também é levado em conta o efeito de capacitâncias shunt na barra de saída da instalação (Y10).

3.4 Modelagem do Processo

O modelo do processo se caracteriza por considerações gerais inerentes ao sistema completo apresentado por ANDERSON (1982) e resultante da aplicação das técnicas das transformações de Park sobre a máquina síncrona, a saber:

- Desconsideração dos efeitos dos amortecedores;
- Desconsideração da resistência de enrolamento do estator;
- Consideração da condição equilibrada nas transformações de Park;
- Consideração dos efeitos da saturação;
- Desconsideração dos efeitos transformadores (derivada de fluxo no domínio do tempo);
- Desconsideração das variações da freqüência elétrica diretamente nas equações de Park.

As funções de transferência mostradas a seguir são resultantes do levantamento e identificação do modelo aplicado à instalação de Martins e seus parâmetros encontram-se validados por ensaios na planta e análise de comportamento operativo, como mostrou GOMES (1992 a, b e 1999). Partindo-se delas é possível construir o diagrama de blocos do processo, como é mostrado na Figura 3.5. A base de valores adotada mostrada na Tabela 3.1.

Para as funções de transferência, diagramas de bloco e análises a seguir considerar as variáveis como variáveis desvio.

TABELA 3.1: BASE DE VALORES ADOTADA.

Grandeza	Valor / Unidade
Freqüência elétrica	377 rad/s - 60Hz
Potência	2250 KW
Tensão	4160 Vca
Curso de servomotor	170 mm
Rotação mecânica	94,24 rad/s – 900 rpm
FEM na linha do entreferro	4350 Vca
Aceleração da gravidade	9,8 m/s^2
Tensão de campo	22,05 Vcc (*)

(*) A tensão de campo correspondente ao valor considerando a linha de entreferro do gerador.

Algumas das constantes apresentadas nas funções de transferência são resultantes da linearização nos valores nominais de trabalho da máquina, como sugeriram MELLO (1983) e AZZAM (1999).

O comportamento operativo de uma turbina hidráulica depende tanto da inércia da água como dos efeitos de compressibilidade da água e de elasticidade das paredes da tubulação adutora. Partindo-se do estudo dos líquidos e considerando a teoria da coluna rígida com as equações do movimento de Euler para líquidos incompressíveis obtém-se a relação entre a abertura do distribuidor (Y) e a potência mecânica (PM) mostrada pela Eq. 3.2 associada à condição de não elasticidade da tubulação, onde Tw é a constante de tempo da inércia da água na tubulação forçada que expressa os efeitos da impedância de surto da tubulação e o período de onda na tubulação. A variável “s” é a variável de Laplace.

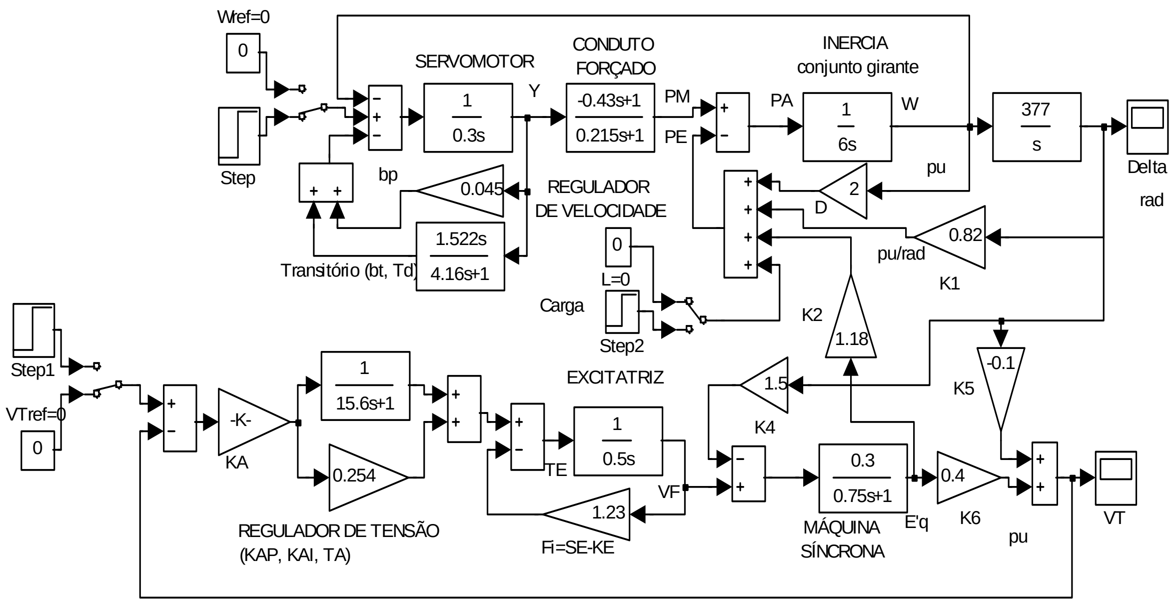


Figura 3.5: Diagrama de blocos com as funções de transferência do processo original, com a presença de reguladores de velocidade e tensão.

$$\frac{PM}{Y} = \frac{1 - sTw}{1 + s(Tw/2)} \tag{3.2}$$

Além dos efeitos da inércia da água na tubulação e da influência desta no controle da potência motriz existe um importante efeito da constante de inércia do conjunto girante. A associação destes efeitos tem a característica de gerar um atraso na malha de regulação desde o regulador de velocidade até a ação do torque produzido no eixo do grupo. Considerando a turbina, o eixo e o gerador acoplados mecanicamente e fazendo-se o balanço de energia no conjunto obtém-se a relação entre a potência transmitida, ora chamada de potência acelerante (PA) e a velocidade angular instantânea do conjunto ou freqüência elétrica apresentada na Eq. 3.3, onde a variável H expressa a constante de inércia do conjunto girante. Está equação mostra que a presença de um torque acelerante aplicado sobre o sistema é suficiente para garantir a existência de uma ação acelerante aplicada ao conjunto que poderá tirá-lo da condição atual de equilíbrio.

$$\frac{\omega}{PA} = \frac{1}{2Hs} \tag{3.3}$$

Por definição o parâmetro D reúne os efeitos de amortecimento que na prática encontra-se associado ao coeficiente de autoregulação da turbina bem como ao efeito de amortecimento de carga e é dado pela Eq. 3.4, onde PCU é a potência da carga.

$$\frac{\omega}{PCU} = \frac{1}{D} \tag{3.4}$$

Considerando que a principal função do regulador de velocidade é manter a rotação da máquina próxima da velocidade de referência, ele utiliza a ação sobre o fluxo de água que aciona a turbina. A quantidade de água que passa pela turbina está associada com a carga alimentada e para uma carga o fluxo motriz já é definido pela abertura do distribuidor que amarra a rotação do grupo num valor nominal. Os sistemas hidráulico e pneumático presentes no regulador de velocidade possuem a importante função de amplificação hidráulica. O conjunto mecânico-hidráulico do regulador é composto por válvula distribuidora e servomotores além da realimentação da posição das palhetas do distribuidor da turbina, que tem a função de introdução, no sistema, do estatismo permanente (bp) que atua na regulação de carga entre máquinas em rede interligada. Para turbinas hidráulicas é necessário também considerar os efeitos transitórios sobre a regulação de velocidade provocados pela ação de inércias do processo que cria uma ação de oposição à operação do sistema frente a desvios rápidos e bruscos de freqüência sendo esta ação compensada pela atuação do bloco ao estatismo transitório (bt), como mostra a Eq. 3.5, onde Td é a constante de tempo do estatismo transitório. A Eq. 3.6 mostra a relação entre a abertura do distribuidor (Y) e a freqüência de referência (ω_{ref}), onde T é a constante de tempo do servomotor.

$$\frac{\omega_{ref}}{Y} = bp + \frac{bt.Tds}{Td.s + 1} \tag{3.5}$$

$$\frac{Y}{\omega_{ref}} = \frac{1}{Ts} \tag{3.6}$$

O excesso de potência no conjugado motriz (PM) em relação ao que está sendo transferido para a carga na forma de potência elétrica (PE) é a potência acelerante como mostra a Eq. 3.7. Na Eq. 3.8 é mostrada a relação entre a freqüência elétrica e o ângulo de potência (δ) onde ω_0 é a freqüência elétrica base adotada cuja Eq. 3.9 mostra a sua definição.

$$PA = PM - PE \tag{3.7}$$

$$\frac{\delta}{\omega} = \frac{\omega_0}{s} \tag{3.8}$$

$$\omega_0 = 2\pi f \tag{3.9}$$

Os efeitos da máquina operando em rede interligada podem ser computados na variável ângulo de potência (δ). A Eq. 3.10 indica a transferência de potência ativa elétrica (PET) de uma máquina síncrona operando como gerador para o barramento de saída da

mesma, onde K_1 é a linearização no ponto de operação para $\delta=\delta_0$. No processo δ_0 é normalmente pequeno e Cos $(\delta_0)\cong$ 1. K_1 é conhecido como coeficiente de torque sincronizante, e é mostrado na Eq. 3.11. V_1 e V_2 são as tensões entre os diferentes pontos de transferência de potência e X_{12} é a impedância de interligação entre as áreas de transferência de potência.

$$PET = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{Sin}\delta = K_1 \delta \text{ onde } K_1 = \left.\frac{\partial PET}{\partial \delta}\right|_{\delta=\delta_0} \tag{3.10}$$

$$\left.\frac{\partial PET}{\partial \delta}\right|_{\delta=\delta_0} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \text{Cos}\delta_0 \cong \frac{V_1 V_2}{X_{12}} = K_1 \text{ onde } \delta_0 \cong 0 \tag{3.11}$$

A potência elétrica transferida pela máquina síncrona (PEM) é mostrada na Eq. 3.12. E'_q é a força eletromotriz (FEM) da máquina síncrona proporcional ao fluxo principal enlaçado pelo estator e K_2 representa a variação da potência elétrica para pequenas variações em E'_q quando o ângulo δ, da FEM, permanece constante como mostra a Eq. 3.13.A potência elétrica considerando, os efeitos da carga, é obtida pela Eq. 3.14.

$$PEM = K_1 \delta + K_2 E'_q \tag{3.12}$$

$$K_2 = \frac{\partial PE}{\partial E'q}, \delta = \delta_0 \tag{3.13}$$

$$PE = PCU + PEM = D\omega + K_1 \delta + K_2 E'_q \tag{3.14}$$

Considerando a modelagem clássica para sistemas de excitação rotativos, com equações inerentes ao processo magnético de funcionamento de uma máquina síncrona, chega-se à relação da tensão de referência (V_{Ref}) e a tensão de campo (V_F) como é mostrado na Eq. 3.15 onde aparecem o ganho (K_E) e a constante de tempo da excitatriz (T_E).

$$\frac{V_F}{V_{Ref}} = \frac{K_E}{1 + T_E s} \tag{3.15}$$

Em muitos casos é necessário considerar na modelagem os efeitos de saturação. Tais efeitos são bastante evidentes e importantes na análise. Sua obtenção pode ser feita pela redução da tensão de saída considerando-se a saturação pela função SE, onde SE = f(V_F) na relação entre a tensão de referência e a tensão de campo. Esta relação expressa pela Eq. 3.16, conforme sugeriu ANDERSON (1982), onde A_{sat} e B_{sat} são parâmetros a serem estimados em função da curva de saturação. Uma vez que se trata de um modelo linear ou com parâmetros linearizados, SE será obtido na faixa de operação nominal da unidade como uma constante e será adicionado ao valor de K_E como mostra a Eq. 3.17.

$$SE = A_{sat} e^{B_{sat}.V_F} \tag{3.16}$$

$$\varphi = SE - K_E \tag{3.17}$$

Partindo da modelagem clássica para máquinas elétricas, considerando fluxo magnético no rotor e no estator, transformações de Blondel e linearizações inerentes à análise, obtém-se a relação entre E'_q e V_F e δ, assim como está mostrado na Eq. 3.18, que depende do estado de funcionamento nominal do gerador. K_3 expressa o fator de impedância de carga e é mostrado na Eq. 3.19 e K_4 representa o efeito desmagnetizante devido à carga e é indicado pela Eq. 3.20. T'do é a constante de tempo de eixo direto da máquina operando em vazio.

$$E'_q = \frac{K_3}{T'_{do}.K_3.s + 1} V_F - \frac{K_4 K_3}{T'_{do}.K_3.s + 1} \delta \tag{3.18}$$

$$K_3 = \left. \frac{\partial E'q}{\partial V_F} \right|_{\delta=\delta_0} \tag{3.19}$$

$$K_4 = - \frac{1}{K_3} \left. \frac{\partial E'q}{\partial \delta} \right|_{V_F = V_{F0}} \tag{3.20}$$

A tensão terminal (VT) pode ser encontrada pela composição apresentada na Eq. 3.21, onde as Equações 3.22 e 3.23 mostram respectivamente K_5 e K_6. K_5 representa a variação da tensão terminal da máquina com relação a pequenas variações no ângulo de potência quando o fluxo enlaçado no entreferro for mantido constante. Já o parâmetro K_6 expressa a variação da tensão terminal com relação a pequenas variações no fluxo enlaçado do entreferro quando o ângulo for mantido constante.

$$VT = K_5 \delta + K_6 E'_q \tag{3.21}$$

$$K_5 = \left. \frac{\partial VT}{\partial \delta} \right|_{E'_q = E'_{q0}} \tag{3.22}$$

$$K_6 = \left. \frac{\partial VT}{\partial E'_q} \right|_{\delta=\delta_0} \tag{3.23}$$

O regulador de tensão neste caso é dado pela Eq. 3.24, onde K_A é o ganho do regulador de tensão e sua unidade é dada em Volts por pu, sendo necessário a inclusão de um fator de normalização, V_{F0}, aplicado ao sistema a fim de se obter um modelo com resposta resultante em pu. K_{AP} é o ganho proporcional do regulador de tensão e K_{AI} é o ganho integral do regulador de tensão e T_A é a constante de tempo integral do regulador de tensão.

$$\frac{V_{REF}}{VT} = K_A \left(K_{AP} + \frac{K_{AI}}{1 + sT_A} \right) \tag{3.24}$$

Este modelo foi aplicado na Usina dos Martins de propriedade da CEMIG, localizada no Rio Uberabinha no município de Uberlândia, estado de Minas Gerais e que possui quatro máquinas com entrada em operação no ano de 1946. A tabela 3.2 mostra os valores para os parâmetros do modelo apresentado:

TABELA 3.2: VALORES NOMINAIS DOS PARÂMETROS.

Parâmetro	Valor / Unidade	Parâmetro	Valor / Unidade
T	0,3 s	K_4	1,15 pu/rad
Tw	0,43 s	K_5	-0,1 pu/rad
bp	0,045 pu/pu	K_6	0,4 pu/pu
bt	0,366 pu	T'_{do}	2,5 s
Td	4,16 s	V_{F0}	22,05 Vcc
2H	6 s	T_E	0,5 s
ω_0	377 rad/s	K_E	0,2 pu
D	2 pu/pu	K_A	-6,5 V/pu
K_1	0,82 pu/rad	K_{AP}	0,254 pu/V
K_2	1,18 pu/pu	K_{AI}	1 pu/V
K_3	0,3 pu/pu	T_A	15,6 s
SE	1,43	--	--

3.5 Resposta do Sistema com os Reguladores Atuais.

A Figura 3.6 mostra a resposta do sistema para um degrau de 0,00045 pu na referência do regulador de velocidade que equivale a um degrau de 1% de potência como mostra a Eq. 3.1. A saída VT é dada em pu e a saída δ é dada em rad.

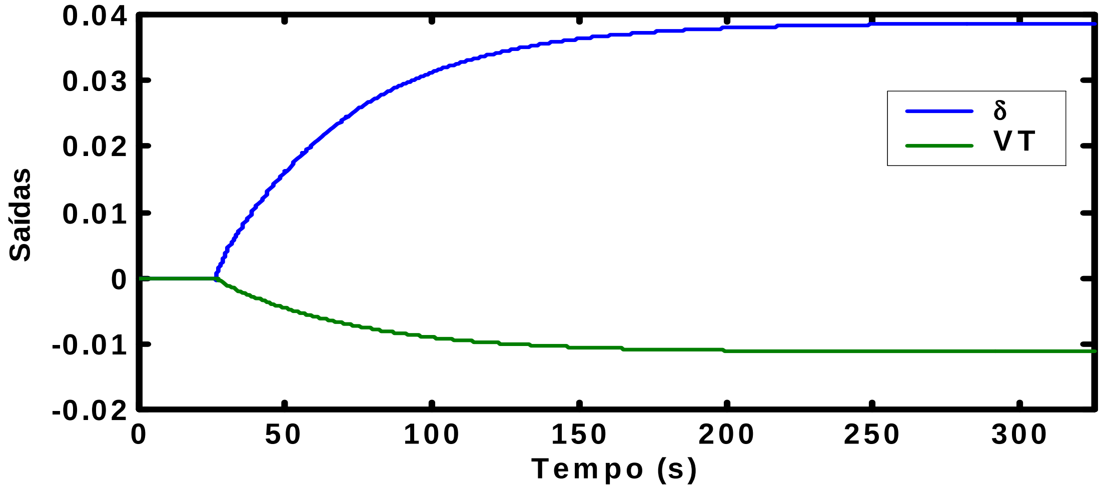


Figura 3.6: Resposta do sistema ao degrau de 0,00045 pu aplicado na referência do Regulador de Velocidade referente à variação de 1% na potência mecânica.

Esta figura mostra que houve uma abertura do ângulo de potência, indicando um aumento na potência transferida a fim de suprir a carga que entrara no sistema. A tensão terminal manteve *offset* em estado estacionário.

A Figura 3.7 mostra a resposta do sistema a um degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão (degrau positivo).

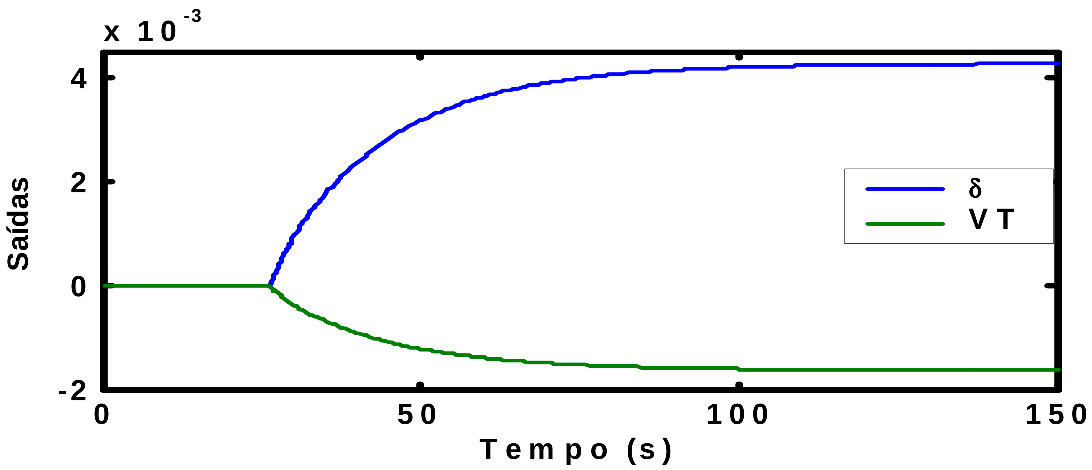


Figura 3.7 – Resposta do sistema ao degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão referente à variação de 0.01 pu na tensão VT.

Uma vez que existe um acoplamento entre as malhas, houve abertura do ângulo de potência e alteração no valor da tensão terminal, porém em valores muito pequenos. Persistem também *offset* em estado estacionário para as duas saídas. Deve-se notar que o degrau para a tensão terminal foi de 0,01 pu positivos e o sistema respondeu levando a tensão terminal para aproximadamente $-1{,}5_x10^{-3}$ pu.

A Figura 3.8 mostra o comportamento do sistema frente a um degrau de 0,01 pu na carga (L) indicando a ocorrência de perturbações ou entrada/saída de cargas do sistema.

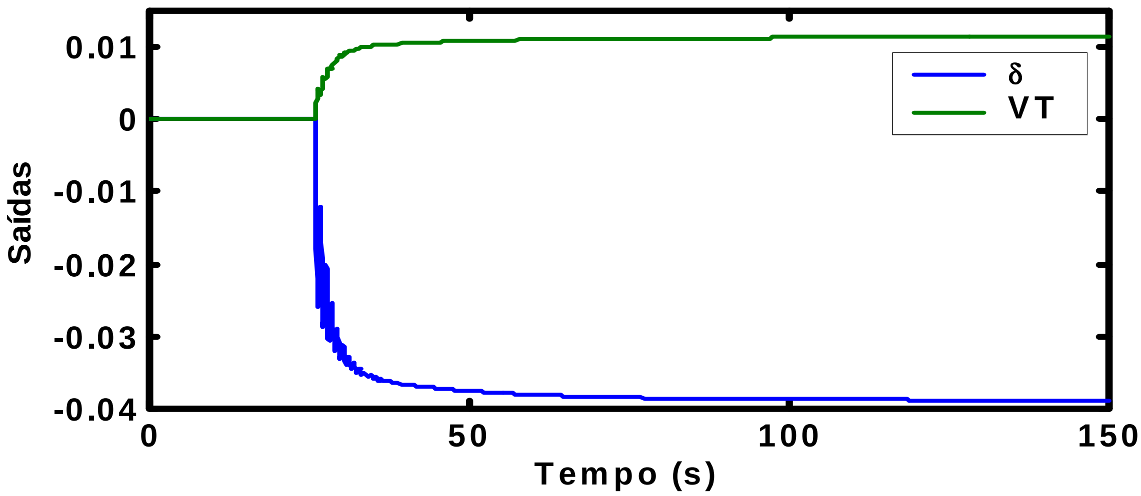


Figura 3.8 – Resposta do sistema ao degrau de 0,01 pu na carga do sistema.

Esta figura mostra que o sistema mantém *offset* nas duas saídas em estado estacionário. Percebe-se também que a entrada de carga no sistema provoca uma forte oscilação nas respostas do mesmo.

3.6 Avaliação dos Parâmetros do Modelo

Uma vez que os parâmetros do modelo foram obtidos de forma experimental em levantamento de campo, como mostrou GOMES (1992, a e b), foram feitas simulações a fim de se avaliar de que maneira e intensidade, alterações nos valores individuais dos parâmetros influenciava na resposta do sistema. Este estudo também teve como finalidade a definição de uma configuração para o sistema em problema de desvio planta/modelo baseado na maneira que o sistema fosse afetado por tais variações. Foram considerados os seguintes casos: 20 % acima, 20 % abaixo em cada parâmetro individualmente e em valores limites dentro da faixa de operação como indicou ANDERSON (1982) para os parâmetros linearizados. Os degraus foram os mesmos aplicados na seção anterior, ou seja, degrau de 0,00045 pu na referência do regulador de velocidade, degrau de 0,01 pu na referência do regulador de tensão e degrau de 0,01 pu na carga aplicada ao sistema. Estes degraus foram aplicados nas entradas Step, Step1 e Step 2 mostrados na Figura 3.5. De maneira geral o comportamento dinâmico não apresentou variação, seguindo o mesmo tipo de curva exibido com os parâmetros originais,

ocorrendo alteração de amplitude e tempo para se atingir o estado estacionário. Os resultados são mostrados nas Tabelas do ANEXO B.

3.7 Alterações na Planta e Modelo em Espaço de Estados

3.7.1 Alterações na Planta

As alterações físicas, na estrutura da planta, necessárias para a implantação deste trabalho basicamente são as seguintes: a instalação de uma eletroválvula na parte superior da válvula piloto no regulador de velocidade mecânico, o que deixaria sem efeito as atuações e realimentações mecânicas do regulador, mantendo apenas a unidade de força, na forma de uma bomba que fornece óleo com pressão de serviço para o comando do distribuidor. Neste caso a realimentação em freqüência seria feita diretamente do sistema de medição a ser implantado para o sistema de controle, constituindo o estatismo permanente necessário na consideração para a nova formulação. O estatismo permanente será mantido constituindo assim uma parte do controle. Outra alteração é a substituição do regulador de tensão, do tipo reostático, por um controlador estático baseado nos SCR ou retificadores especial denominados tiristores de potência. A Figura 3.9 mostra o regulador de velocidade atual, a Figura 3.10 mostra o regulador de tensão atual e a excitatriz. A Figura 3.11 mostra o esquema das modificações para uso deste trabalho. A Figura 3.12 mostra o novo conjunto de funções de transferência em que se baseará a construção do modelo em espaço de estados. Os estados do sistema seriam medidos ou estimados, quando for o caso, e trabalhados por um sistema de aquisição e finalmente enviados para o processamento pelo controlador, situado em um CLP ou em um computador, resultando em duas saídas para a planta: uma entrando na eletroválvula e outra na excitação baseada em tiristores. Considerando a implantação, sem com isto entrar nos problemas para a execução destas alterações, as análises indicam que são viáveis tais alterações. A função de transferência referente a eletroválvula foi considerada igual a 1, encontrando-se incluída na função de transferência do servomotor. A função de transferência do novo sistema de excitação cuja característica apresenta constante de tempo muito pequena está sendo representada apenas por um ganho. Estes parâmetros devem ser obtidos em fase de projeto do *hardware*.

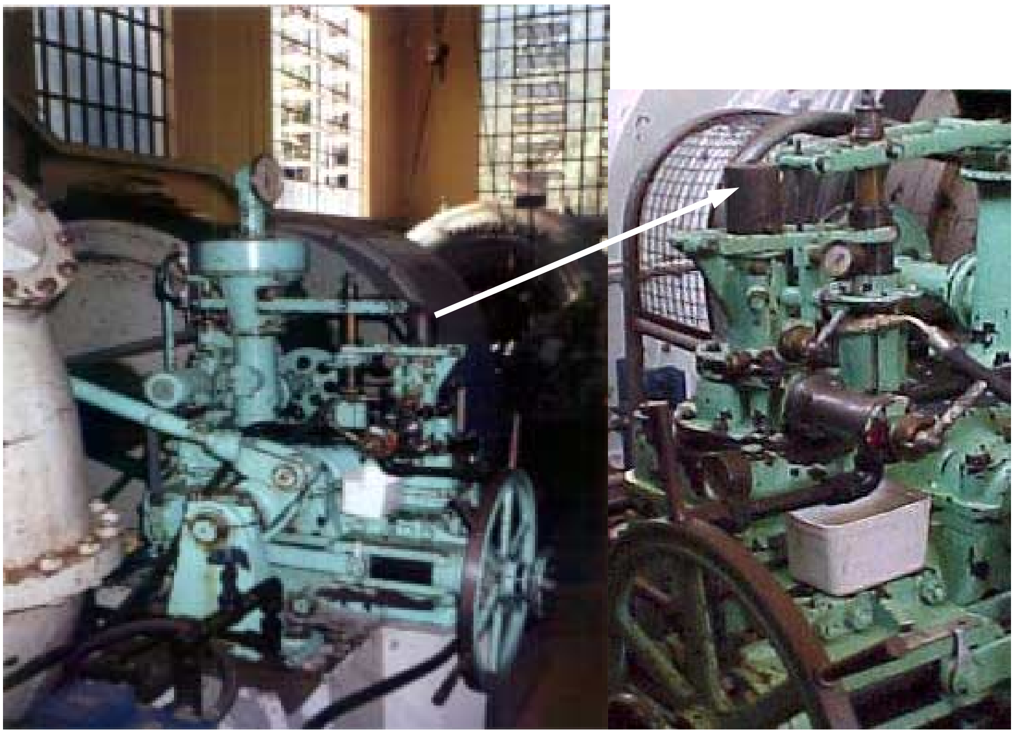


Figura 3.9 –Foto - Regulador de Velocidade atual e detalhe da válvula piloto.

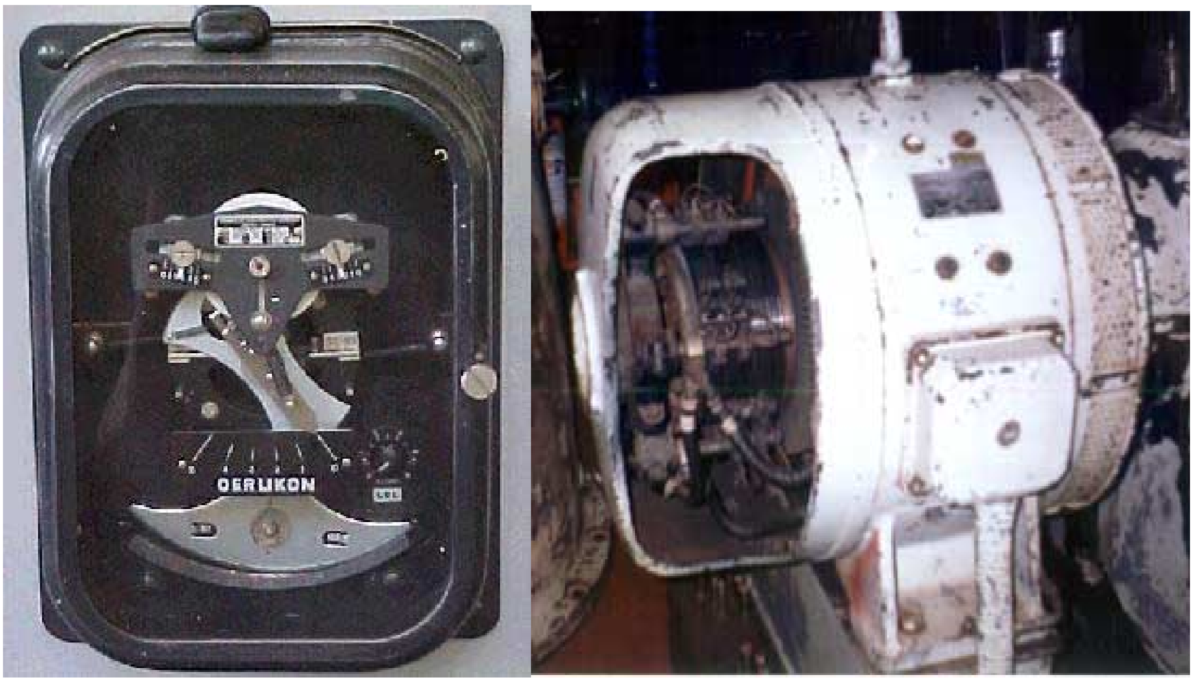


Figura 3.10 – Foto - Regulador de tensão e excitatriz atualmente em funcionamento.

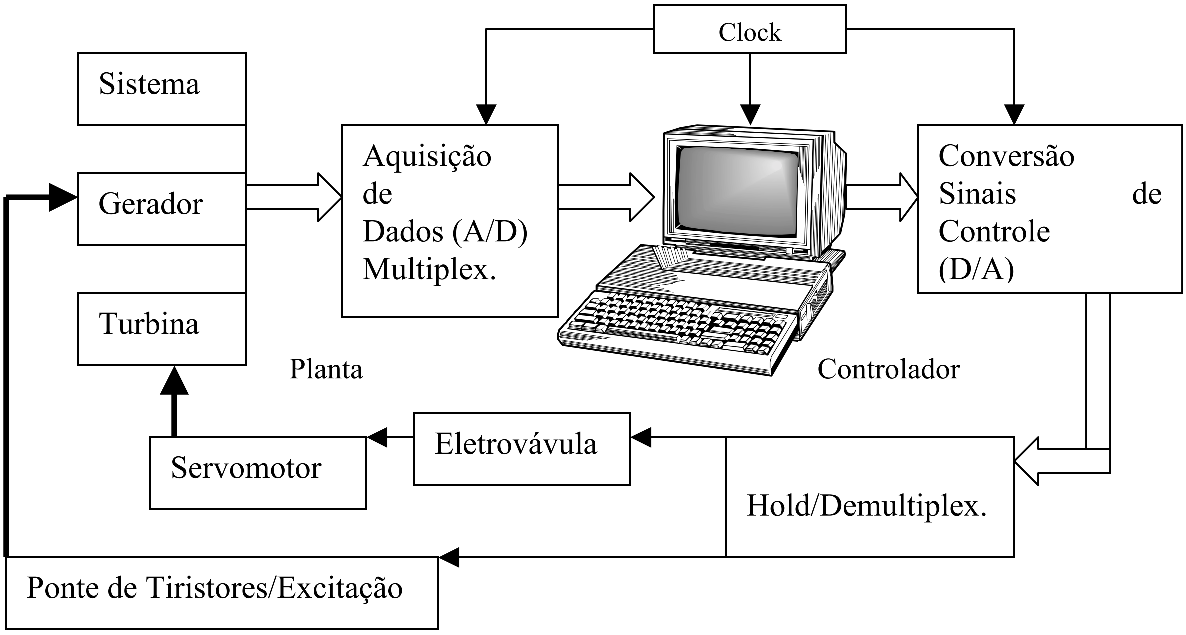


Figura 3.11 – Esquemático de alterações propostas.

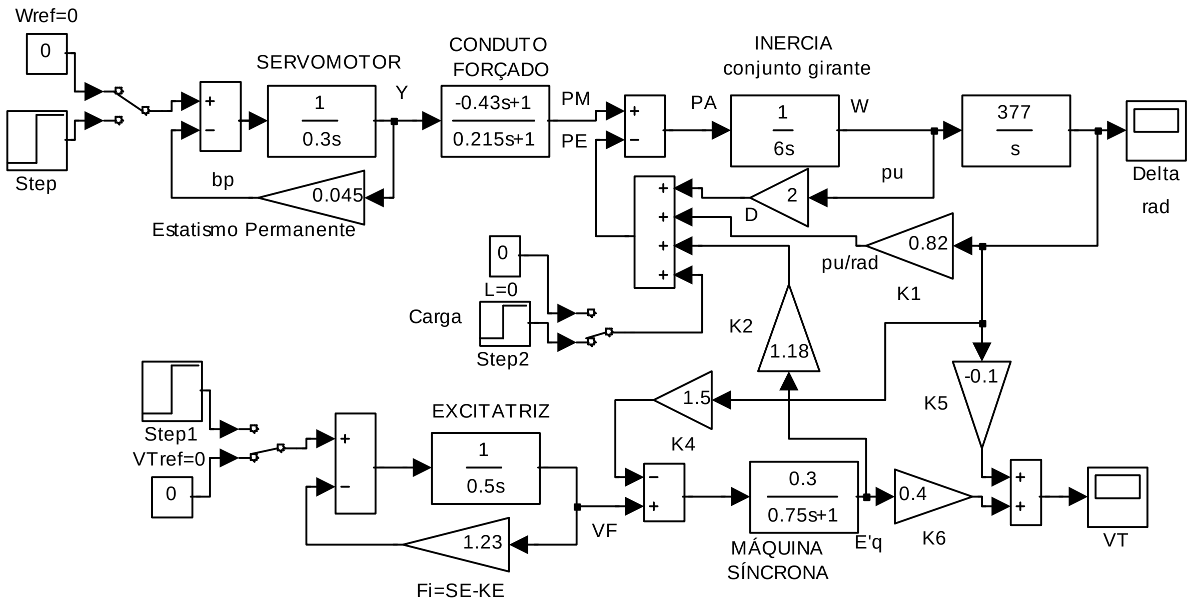


Figura 3.12 –Diagrama de blocos de funções de transferência considerando as alterações, constituindo a nova malha aberta para construção do modelo em espaço de estados.

3.7.2 Modelo em Espaço de Estados

Após a manipulação algébrica das funções de transferência apresentadas na Figura 3.12, com as devidas considerações para alteração na estrutura do processo, obtém-se a forma clássica de espaço de estados, mostrada nas Eqs. 3.25 e 3.26, onde a matrizes **A**, **B, B$_1$** e **C** são mostradas nas Eqs. 3.27, 3.28, 3.29 e 3.30. A matriz **D** mostrada na Eq. 2.2 é igual a **0**. O

vetor dos estados (**x**), das entradas (**u**) e das saídas (**y**) são indicados nas Equações 3.31, 3.32 e 3.33, respectivamente. O vetor **d** expressa as entradas na forma de perturbações não medidas. Pela entrada chamada de d é que de ora em diante será nomeada a entrada até então referida como L. Isto será feito para manter a nomenclatura usual para a formulação em espaço de estados.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{d}(t) \tag{3.25}$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \tag{3.26}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{bp}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{Tw} & -\frac{2}{Tw} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H} & \frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & 0 & -\frac{K_2}{2H} \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\varphi}{T_E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_4}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{1}{K_3 T'_{do}} \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_E} & 0 \end{bmatrix} \tag{3.28}$$

$$\mathbf{B}_1{}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} Y & x_2 & \omega & \delta & V_F & E'_q \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

$$\mathbf{u}^T = \begin{bmatrix} \omega_{REF} & VT_{REF} \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

$$\mathbf{y}^T = \begin{bmatrix} \delta & VT \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

Nas Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 são mostrados os gráficos para os mesmos degraus aplicados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, considerando agora a malha aberta para a nova configuração do processo e nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18, o mesmo procedimento aplicado à malha aberta do processo sem nenhum tipo de regulação. Os degrau e cargas mostrados nos gráficos a seguir forma aplicados no instante t = 26 s.

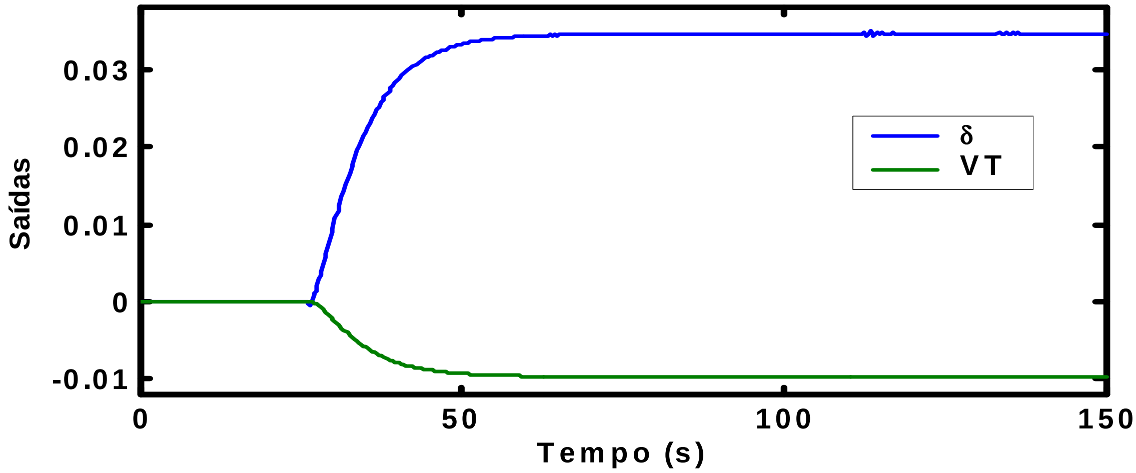


Figura 3.13 – Degrau de 0,00045 pu em “Step”, da Figura 3.12, considerando a presença de bp.

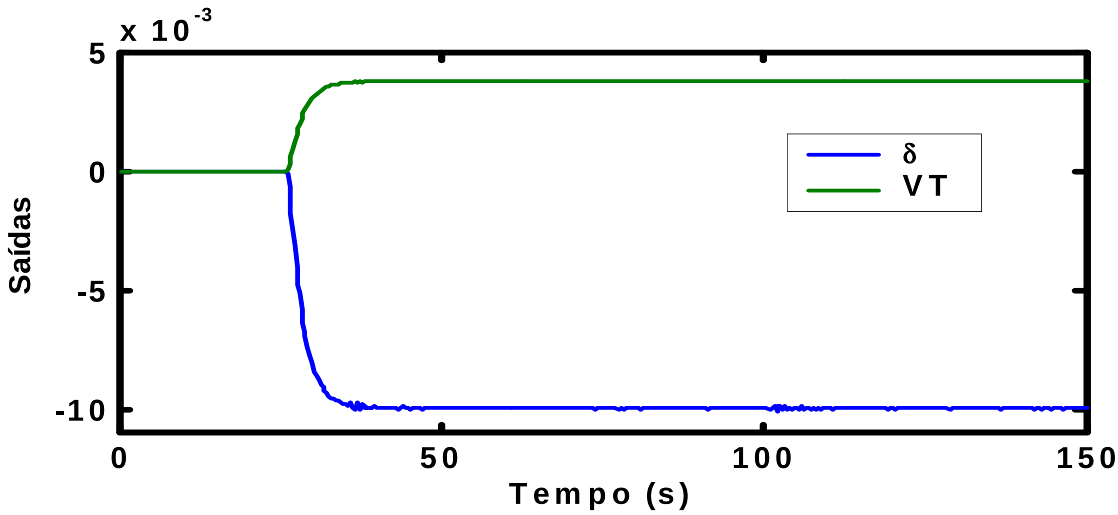


Figura 3.14 –Degrau de 0,01 pu em “Step1” da Figura 3.12, considerando a presença de bp.

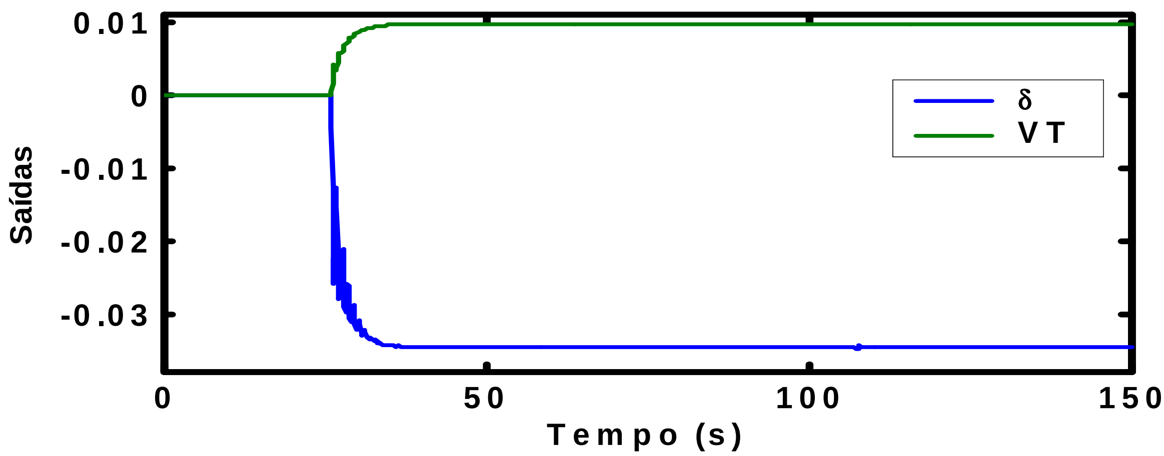


Figura 3.15- Degrau de 0,01 pu em “Step2” da Figura 3.12, considerando a presença de bp.

As Figuras 3.13, 3.14 e 3.15 expressam as respostas do sistema em malha aberta e mostram que o processo é estável. Da mesma forma que na Figura 3.8 a entrada de uma carga no sistema provoca um a grande oscilação nos sistema, agora considerando a malha aberta.

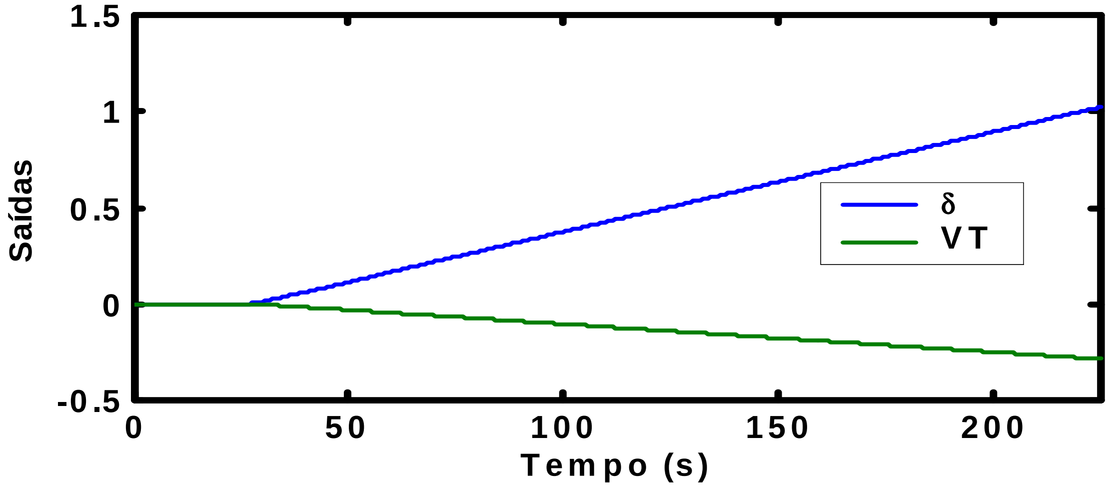


Figura 3.16: Degrau de 0,00045 pu em "Step" desconsiderando a realimentação bp.

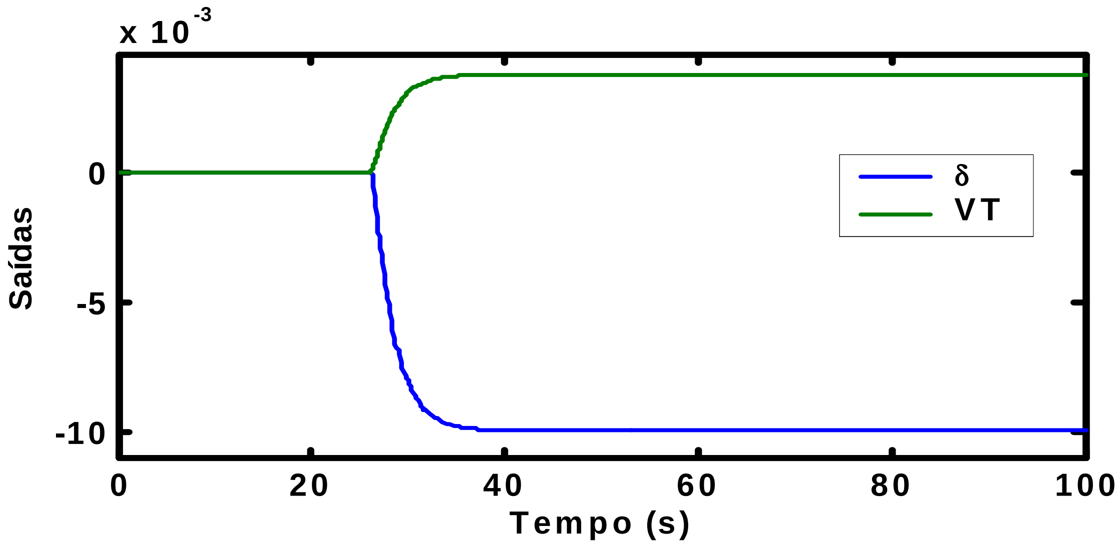


Figura 3.17: Degrau de 0,01 pu em "Step1" desconsiderando a realimentação bp.

A Figura 3.16 mostra que o sistema é instável em malha aberta retirando-se a realimentação bp frente a um degrau no laço de velocidade. Para degrau no laço de tensão ou entrada de carga, vistos nas Figuras 3.17 e 3.18, o sistema é estável e valem as mesmas considerações feitas para as Figura 3.14 e 3.15.

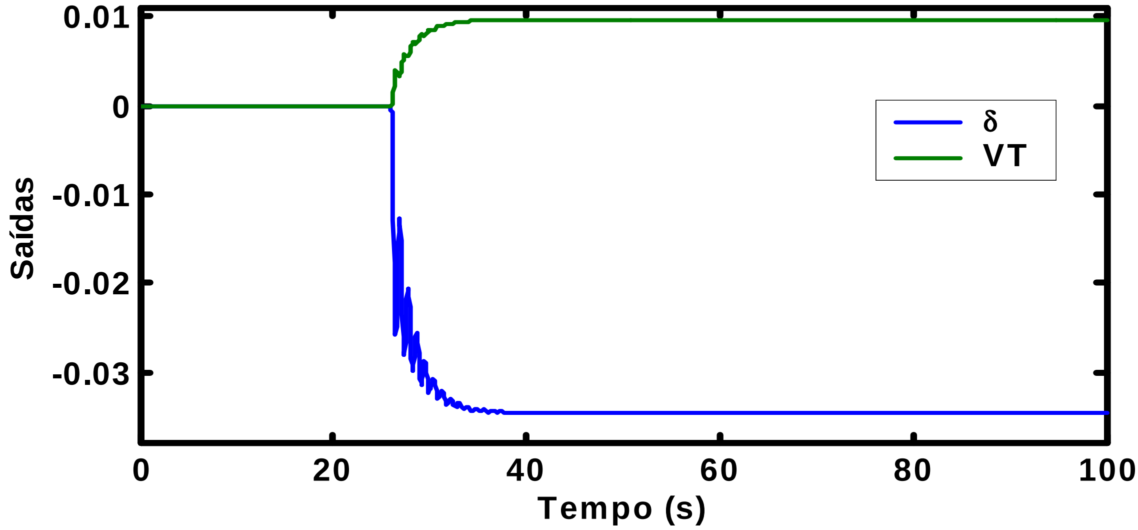


Figura 3.18: Degrau de 0,01 pu em "Step2" desconsiderando a realimentação bp.

A Figura 3.16 mostra que o sistema é instável em malha aberta retirando-se a realimentação bp frente a um degrau no laço de velocidade. Para degrau no laço de tensão ou entrada de carga o sistema é estável e valem as mesmas considerações feitas para as Figura 3.14 e 3.15.

As Figuras 3.19 e 3.20 mostram a resposta do sistema em duas condições com redução de escala a fim de ilustrar a oscilação a que o sistema é submetido na ocorrência de variações e perturbações. Os degraus destas figuras foram aplicados no instante t = 1s.

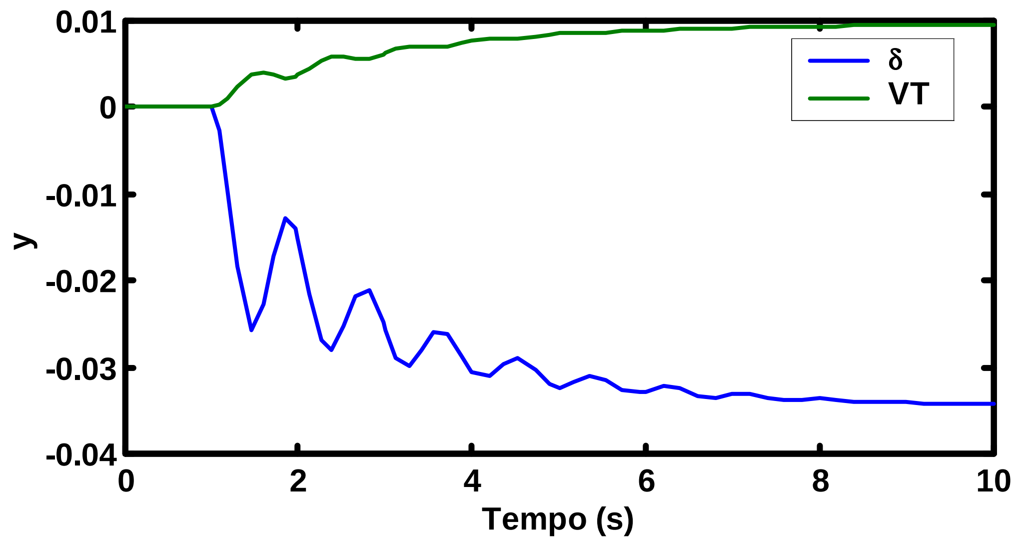


Figura 3.19: Degrau de 0,01 pu em "Step2" considerando a realimentação bp.

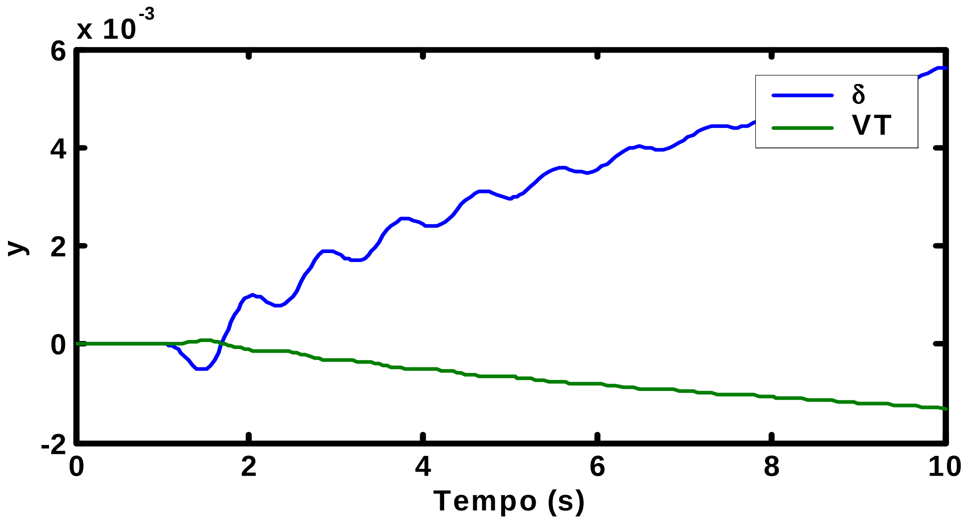


Figura 3.20: Sistema original submetido a uma variação de 0,01 em Step.

Estas Figuras ilustram a intensa oscilação a que se encontra sujeito o sistema durante uma perturbação ou alteração de *setpoint*.

3.7.3 Controlabilidade

Como mostrou OGATA (1993), um sistema possui estados completamente controláveis se e somente se o posto da matriz de controlabilidade, apresentada na Eq. 3.34 for igual ao número dos estados do sistema. Além disso o sistema possui saídas completamente controláveis se somente se a matriz de controlabilidade de saída, apresentada na Eq. 3.35, possuir posto igual ao número de saídas.

$$\text{CTRBEstado} = \left[\mathbf{B} \quad \mathbf{AB} \quad \ldots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}\right] \tag{3.34}$$

$$\text{CTRBSaída} = \mathbf{C}\left[\mathbf{B} \;\; \mathbf{AB} \;\; \ldots \;\; \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}\right] \tag{3.35}$$

A matriz apresentada na Eq. 3.36 mostra a matriz de controlabilidade dos estados do sistema e a Eq. 3.37 mostra a matriz de controlabilidade das saídas do sistema. A matriz da Eq. 3.36 possui posto igual a 6, que é o número de estados, comprovando que o sistema é de estado completamente controlável. A matriz da Eq. 3.37 possui posto igual a 2, que é o número de saídas, comprovando que o sistema é de saída completamente controlável.

$$
\mathrm{CTRBEstado}^{T} = \begin{pmatrix}
3{,}3333 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 2{,}0000 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}1666 & 0 & 0 & 0 \\
-0{,}5000 & 46{,}5116 & -1{,}1111 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -4{,}9200 & 0{,}8000 \\
0 & 0 & -0{,}0555 & 62{,}8333 & 0 & 0 \\
0{,}0750 & -223{,}3098 & 8{,}2889 & -418{,}8888 & -3{,}0346 & 0 \\
0 & 0 & -0{,}1573 & 0 & 0 & -3{,}0346 \\
0 & 0 & -8{,}568 & -20{,}9444 & 0 & -37{,}7000 \\
-0{,}0112 & 1039{,}6971 & 17{,}2418 & 3124{,}9435 & 0 & 251{,}3333 \\
0 & 0 & 0{,}6492 & -59{,}3146 & -29{,}7738 & 8{,}8875 \\
0 & 0 & 13{,}1329 & -3230{,}4012 & 0 & 62{,}8333 \\
0{,}0016 & --4835{,}9578 & -308{,}9651 & 6500{,}1737 & 0 & -2210{,}0772 \\
0 & 0 & 6{,}1420 & 244{,}7718 & 73{,}2437 & 11{,}8292 \\
0 & 0 & 424{,}7532 & 4951{,}1316 & 0 & 1854{,}4630 \\
-0{,}0002 & 22492{,}8509 & -1156{,}7170 & -116479{,}8713 & 0 & -953{,}3345 \\
0 & 0 & -37{,}8259 & 2315{,}5496 & -180{,}1795 & -133{,}3379 \\
0 & 0 & -1182{,}9501 & 160131{,}9927 & 0 & -5443{,}2963
\end{pmatrix} \tag{3.36}
$$

$$
\mathrm{CTRBSaida}^{T} = \begin{pmatrix}
0 & 0 \\
0 & 0 \\
0{,}1666 & 0 \\
-1{,}1111 & 0 \\
0 & 0{,}3200 \\
-0{,}0555 & -6{,}2833 \\
8{,}2889 & 41{,}8888 \\
-0{,}1573 & -1{,}2138 \\
-8{,}5687 & -12{,}9855 \\
17{,}2418 & -211{,}9610 \\
0{,}6492 & 9{,}4864 \\
13{,}1329 & 348{,}1734 \\
308.9651 & 1534{,}0482 \\
6{,}1420 & -19{,}7454 \\
424{,}7532 & 246{,}6720 \\
-1156{,}7137 & 11266{,}6532 \\
-37{,}8259 & -284{,}8901 \\
-1182{,}9501 & -18190{,}5178
\end{pmatrix} \tag{3.37}
$$

3.7.4 Observabilidade

Como mostrou OGATA (1993), um sistema possui estados completamente observáveis se e somente se o posto da matriz de observabilidade, apresentada na Eq. 3.38 for igual ao número dos estados do sistema.

$$\text{OBSV}^{\text{T}} = \left[\mathbf{C}^{\text{T}} \quad \mathbf{A}^{\text{T}}\mathbf{C}^{\text{T}} \quad \ldots \quad (\mathbf{A}^{\text{T}})^{\text{n}-1}\mathbf{C}^{\text{T}} \right] \tag{3.38}$$

A matriz apresentada na Eq. 3.39 possui posto igual a 6, que é o número de estados, comprovando que o sistema é completamente observável.

$$\text{OBSV} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1{,}0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0{,}1000 & 0 & 0{,}4000 \\ -0{,}3333 & 0{,}1666 & -0{,}3333 & -0{,}1366 & 0 & -0{,}1966 \\ 0 & 0 & -37{,}7000 & -0{,}2400 & 0{,}1600 & -0{,}5333 \\ 2{,}4866 & -0{,}8307 & -51{,}4122 & 0{,}1635 & -0{,}0786 & 0{,}3277 \\ 12{,}5666 & -6{,}2833 & -77{,}9133 & 5{,}4723 & -0{,}6069 & 8{,}1254 \\ 5{,}1725 & -4{,}7047 & 78{,}7978 & 6{,}8296 & 0{,}3246 & 9{,}6740 \\ -63{,}5883 & 16{,}2392 & 2089{,}0407 & 5{,}7728 & 4{,}7432 & 4{,}4890 \\ -92{,}6895 & 35{,}0155 & 2548{,}5197 & -16{,}5734 & 3{,}0710 & -28{,}3956 \\ -460{,}2144 & 272{,}6420 & 1480{,}0321 & -288{,}1956 & -9{,}8727 & -416{,}8300 \\ -347{,}0111 & 261{,}8902 & 7097{,}7009 & -331{,}2603 & -18{,}9129 & -463{,}3480 \\ 3379{,}9959 & -1021{,}4305 & 1.09143{,}1069 & 47{,}8269 & -142{,}4450 & 264{,}7004 \end{pmatrix} \tag{3.39}$$

3.7.5 Estabilidade

Existem muitos métodos de análise de estabilidade. Neste tópico, por simplicidade de obtenção, é mostrada a análise de estabilidade segundo o procedimento da inspeção dos autovalores da matriz **A**, mostrada na Eq. 2.1, uma vez que se trata de um sistema relativamente pequeno. Como mostrou D'ÁZZO e HOUPIS (1978), um sistema é estável se todos os autovalores do sistema, obtidos da matriz **A,** possuírem parte real negativa. Os autovalores são determinantes nas características das trajetórias dos estados no plano de fases. Para sistemas de altas ordens torna-se complicada a análise da estabilidade baseada nos autovalores explícitos. Lyapunov estudou este problema e propôs o cálculo de uma função escalar V para a determinação da estabilidade como condição suficiente, porém não

necessária. Este método também leva em conta a condição de estabilidade não assintótica. Existem casos de sistemas não globalmente estáveis, porém localmente estáveis. O estudo do controle ótimo incorpora esta teoria.

Na Eq. 3.40 são mostrados os autovalores da matriz **A**, que corresponde ao estudo de estabilidade do sistema em malha aberta com as alterações propostas.

$$\text{POLOS}(\mathbf{A}) = \begin{bmatrix} -0{,}1500 & -0{,}4710 & -0{,}5978 + 7{,}144i & -0{,}5978 - 7{,}144i & -2{,}4600 & -4{,}6512 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Pode-se observar que todos estes autovalores possuem parte real negativa, e logo o sistema é estável em malha aberta. Isto é devido à consideração do parâmetro bp para o modelo em estudo.

Na Eq. 3.41 são mostrados os autovalores para a malha aberta do processo desconsiderando bp, o que expressa o sistema sem nenhum tipo de regulação em malha aberta. O sistema possui um autovalor igual a zero que está associado a um processo integrador em algum estado do sistema. Logo variações na entrada deste estado levarão a integração deste sinal, obtendo-se uma saída ilimitada, como foi mostrado pela Figura 3.16.

$$\text{Polos}(\mathbf{MA}) = \begin{bmatrix} 0 & -0{,}4710 & -0{,}5978 + 7{,}1447i & -0{,}5978 - 7{,}1447i & -2{,}4600 & -4{,}6512 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

3.7.6 Observadores de Estado

A partir da definição dos estados pela Eq. 3.31, pode-se observar que quatro estados: abertura do distribuidor (Y), freqüência elétrica (ω), tensão de campo (V_F) e o ângulo de potência (δ) podem ser medidos. Mas os estados: x_2, associado à tubulação e a FEM da máquina síncrona proporcional ao fluxo principal enlaçado pelo estator (E'_q) apresentam dificuldade para medição sendo necessário o uso de observadores de estado. Inicialmente será feito um estudo de observadores de estado de ordem plena e prosseguindo será estudado o caso de observadores de ordem mínima, que se aproxima mais da realidade. Para este caso é necessário, porém colocar o sistema com estados dados pela Eq. 3.31 na forma adequada para o estudo, separando as variáveis mensuráveis e as variáveis estimadas. Isto é possível por simples manipulação algébrica, baseado nas Eqs. 3.27 a 3.33, obtendo-se o sistema apresentado nas Eqs. 3.43 3.44, 3.45, 3.46, 3.47, 3.48 e 3.49. Os autovalores para este sistema são apresentados na Eq. 3.42 são idênticos aos apresentados na Eq. 3.41

$$\text{Polos}(\mathbf{MA_m}) = [0 \ \ -0{,}4710 \ \ -0{,}5978+7{,}1447i \ \ -0{,}5978-7{,}1447i \ \ -2{,}4600 \ \ -4{,}6512] \tag{3.42}$$

$$\mathbf{A_m} = \begin{bmatrix} -\frac{bp}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{H} & -\frac{D}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & 0 & -\frac{K_2}{2H} & \frac{1}{2H} \\ 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\varphi}{T_E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_4}{T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & 0 \\ \frac{6}{Tw} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{Tw} \end{bmatrix} \tag{3.43}$$

$$\mathbf{B_m}^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_E} & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

$$\mathbf{B_{1m}}^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

$$\mathbf{C_m} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

$$\mathbf{x_m}^T = [Y \ \ \omega \ \ V_F \ \ \delta \ \ x_2 \ \ E'_q] \tag{3.47}$$

$$\mathbf{u_m}^T = [\omega_{REF} \ \ VT_{REF}] \tag{3.32}$$

$$\mathbf{y_m}^T = [\delta \ \ VT] \tag{3.49}$$

3.7.7 Limitações do Processo.

As limitações são de natureza: mecânica, ligada às movimentações do distribuidor e perturbações mecânicas a que a máquina encontra-se sujeita, elétrica, ligada a capacidade de isolamento dos componentes do sistema e sistêmica, ligada aos requisitos de qualidade de fornecimento da energia, a capacidade dos sistemas se manterem interligados e oscilações eletrodinâmicas oriundas de chaveamentos e manobras; e podem ser estabelecidas como mostra a lista a seguir:

- As taxas de abertura e de fechamento do distribuidor devem ser menores que ±0,01 pu por segundo, respectivamente.

- A taxa de variação da tensão deve ser menor que 0,03 pu por segundo em 3 segundos.
- Para a tensão terminal deve ser evitado o perfil de ultrapassagem no valor de *setpoint*.
- O ganho do canal do regulador de tensão não deve ser muito elevado, pois desta forma pode-se ampliar as oscilações da tubulação hidráulica no processo via canal do regulador de tensão.
- A faixa permissível para o regulador de tensão em regime permanente é de 10%, acima e abaixo do valor da tensão nominal regulada.
- A variação de ângulo de potência deve ser menor que um $\delta_{máx}$, que está ligado com a firmeza elétrica e a estabilidade do sistema (limite de estabilidade transitória).

3.8 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de apresentar de forma sucinta o processo de geração de energia, este que é um tema extenso, complexo e caracterizado por sua interdisciplinaridade. Foi traçada uma cronologia histórica a respeito do assunto abordando os principais conceitos. Foi também apresentado o modelo da PCH dos Martins a ser utilizado na validação do software resultante dos estudos dos controladores projetados nos capítulos seguintes. Foram apresentados estudos realizados neste modelo considerando: os reguladores atualmente em funcionamento; a nova malha aberta proposta com e sem a consideração do parâmetro bp; variação dos parâmetros do modelo e os fatores limitantes. Estes estudos forneceram importantes informações que possibilitam e facilitam a aplicação da teoria de controle e ainda sensibilidade e domínio sobre o processo, características essenciais quando se trata do controle do processo. Espera-se que o leitor com as informações fornecidas nos capítulos anteriores, juntamente com o conhecimento de processo oferecido por este capítulo possa compreender a relação processo/controle apresentada nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 4

4. PROJETO DE CONTROLADOR POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS

4.1 Introdução

Esta técnica inicia-se com a determinação dos pólos desejados da malha fechada de controle, baseada nos requisitos de resposta transitória e/ou resposta em freqüência, tais como velocidade, razão de amortecimento ou largura de faixa, bem como requisitos de estado estacionário. Este processo funciona muito bem para sistemas com poucos estados e/ou aqueles que podem ser associados a respostas de sistemas de segunda ordem. Na medida em que se aumenta o número de estados a associação deles com uma característica desejada fica ainda mais complexa, sendo de difícil determinação, a não ser que haja um estudo mostrando a influência de cada pólo para a resposta dinâmica do sistema, como por exemplo, o estudo fornecido pela matriz de sensitividade. Outra forma de se obter um bom resultado é pela simulação de vários sistemas, o que pode tornar a sistemática extremamente demorada e exaustiva. A partir dos pólos é obtida uma matriz de ganho apropriada para realimentação de estado forçando o sistema a ter os pólos de malha fechada nas posições escolhidas e isto se o sistema for completamente controlável.

Para este estudo o sistema foi modelado em espaço de estados e dele extraídos os pólos, que foram utilizados como pólos desejados para cálculo da matriz de realimentação. Desta forma foi projetado um controlador por imposição de pólos que possui uma dinâmica que, no mínimo, atenda ao processo, como ocorre com os controladores atualmente instalados. Este estudo teve basicamente dois enfoques: o problema regulador, onde os *setpoints* são nulos (variáveis desvio) e a perturbação ocorre nos estados. Neste caso através da atuação do controlador, todos os estados deverão retornar para a origem; e o problema servo, onde as perturbações são nulas sendo provocadas variações apenas nos *setpoint*. No problema servo também pode ser avaliado o comportamento do sistema com a entrada de uma carga. Para cada um destes casos houve também estudos de observadores, de ordem plena, considerando que todas as variáveis não estão acessíveis para medição, e ordem mínima, considerando o

caso real onde apenas algumas variáveis não são mensuráveis. Consideram-se também, para a modelagem, dois casos: modelagem perfeita e desvio planta-modelo.

4.2 Formulação

4.2.1 Problema Regulador

Considerando o sistema dado pela Eq. 2.1 e o sinal de entrada (**u**) como mostrado na Eq. 2.3, obtém-se o novo sistema na forma da Eq. 4.1 apresentado por OGATA (1993), que resolvido segundo a Eq. 2.13, resultando na Eq. 4.2, onde **x**(0) é o estado inicial.

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x} \tag{4.1}$$

$$\mathbf{x}(t) = e^{(\mathbf{A}-\mathbf{BK})t}\mathbf{x}(0) \tag{4.2}$$

A figura 2.3 ilustrou está configuração.

4.2.2 Problema Servo

Considerando o sistema representado pelas Equações 2.1 e 4.3, a lei de controle (**u**) mostrada na Eq. 4.4 e o vetor de desvios (**ξ**) das saídas em relação ao *setpoint* (**r**) apresentado na Eq. 4.5, por manipulação algébrica obtém-se a Eq. 4.6 como mostrou OGATA (1993), onde **I** é a matriz identidade. Considerando o processo representado pelo modelo apresentado na Eq. 3.25, para o estudo de problema servo em qualquer caso, seja na presença ou ausência de observadores, será considerada igual a zero a entrada referente ao vetor de perturbações não medidas (**d**). Esta entrada será mostrada separadamente no tópico 4.2.4.

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \tag{4.3}$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{Kx} + \mathbf{k}_i\xi \tag{4.4}$$

Onde $\mathbf{k_i}$ é o ganho integral para problema servo.

$$\xi = \mathbf{r} - \mathbf{y} = \mathbf{r} - \mathbf{Cx} \tag{4.5}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{Bk}_i \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{r} \tag{4.6}$$

A lei de controle suplementar integral será utilizada neste controle como mostra a Eq. 4.7. As matrizes $\mathbf{A}_S$ e $\mathbf{B}_S$ são mostradas nas Eqs. 4.8 e 4.9. O sistema pode então ser representado pela Eq. 4.10.

$$\xi = \int \dot{\xi} dt \tag{4.7}$$

$$\mathbf{A_s} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{Bk_i} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

$$\mathbf{B_s} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

A resolução da Eq 4.10. é mostrada na Eq. 4.11, como indicou a Eq. 2.15.

$$\dot{\mathbf{e}}_S = \mathbf{A_S e_S} + \mathbf{B}_S \mathbf{r} \tag{4.10}$$

$$\mathbf{e}_S(t) = e^{\mathbf{A}_S t}\mathbf{e}_S(0) + \mathbf{A_S}^{-1}\left(e^{\mathbf{A}_S t} - \mathbf{I}\right)\mathbf{B}_S \mathbf{r} \tag{4.11}$$

Onde **e** é a composição dos estados e dos desvios e mostra a dinâmica do sistema. **e**(0) é o conjunto de condições iniciais. As saídas são obtidas na Eq. 4.12. A Figura 4.1 ilustra a configuração do sistema.

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C}\ \ \mathbf{0}]\mathbf{e}_S \tag{4.12}$$

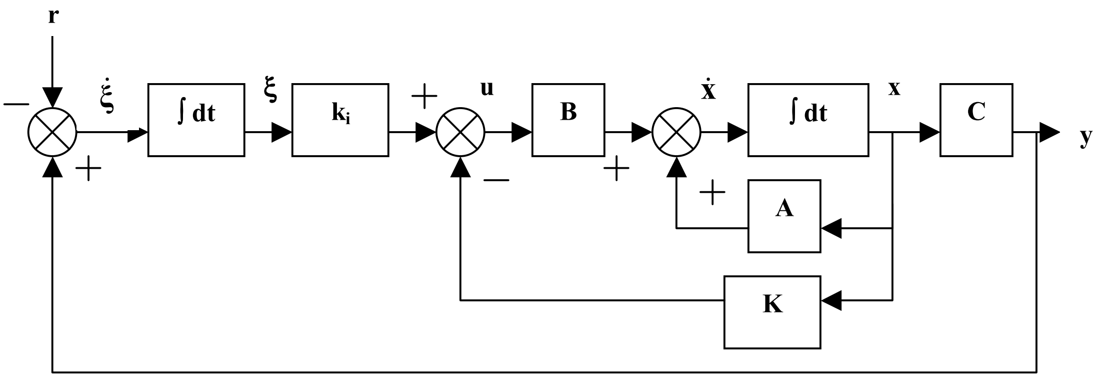


Figura 4.1: Configuração do sistema para o problema servo.

4.2.3 Observadores de Estado

Observador de Ordem Plena: problema regulador

Para este caso é necessário levar em consideração as equações de sistema dadas pelas Eqs. 2.1 e 4.3, pela forma do observador apresentado na Eq. 2.9 e pela lei de controle mostrada na Eq. 4.13. Considerando-se que o sistema é completamente observável e que **x** deve ser aproximado por $\tilde{\mathbf{x}}$, fez-se a diferença das equações Eq. 2.9 e 4.1, obtendo-se o vetor de erro do estimador, $\dot{\mathbf{e}}_{RP}$, apresentado na Eq. 4.14 e como mostrado por OGATA (1993). A

solução do problema é apresentada na Eq. 4.15 e mostra a dinâmica do erro do estimador, que pode apresentar uma condição desejável a partir do projeto de $\mathbf{K_e}$ que é uma matriz ponderação auxiliar na diferença planta/modelo. A correção do sistema a que ela se propõe envolve a diferença entre a saída medida e a saída estimada.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}} \tag{4.13}$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{RP} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}_e\mathbf{C})\mathbf{e}_{RP} \tag{4.14}$$

$$\mathbf{e}_{RP}(t) = e^{(\mathbf{A}-\mathbf{K}_e\mathbf{C})t}\mathbf{e}_{RP}(0) \tag{4.15}$$

A Eq. 4.15 tem sua razão física. Como partiu-se da condição de observabilidade total do sistema é evidente que a melhor maneira de considerar a diferença entre a planta e o modelo será pela comparação entre as variáveis de saída. Fazendo-se a composição de $\mathbf{x}$ e $\tilde{\mathbf{x}}$, como apresenta a Eq. 4.16 resolvendo-a chega-se à Eq. 4.17. A Eq. 4.18 mostra a composição da matriz $\mathbf{A_e}$. As saídas do sistema são mostradas na Eq. 4.19.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{BK} \\ \mathbf{K}_e\mathbf{C} & \mathbf{A} - \mathbf{BK} - \mathbf{K}_e\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} \tag{4.16}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = e^{(\mathbf{A}_e)t} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \tilde{\mathbf{x}}(0) \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{BK} \\ \mathbf{K}_e\mathbf{C} & \mathbf{A} - \mathbf{BK} - \mathbf{K}_e\mathbf{C} \end{bmatrix} \tag{4.18}$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} \tag{4.19}$$

A Figura 2.4 ilustra este problema.

Observador de Ordem Plena: problema servo

Partindo-se do sistema na forma das Eqs. 2.1, 4.3, do vetor de desvios das saídas em relação ao *setpoint* apresentado pela Eq. 4.5 e pela lei de controle fornecida pela Eq. 4.20, por rearranjo obtém-se a Eq. 4.21. As matrizes $\mathbf{A_{SO}}$ e $\mathbf{B_{SO}}$ são mostradas nas Eq. 4.22 e 4.23. O vetor composto pelos estados, pelos desvios das saídas e pelos estados estimados é mostrado na Eq. 4.24. Na Eq. 4.25 é mostrada a resolução para esta equação, que fornece a dinâmica do sistema. A solução deste problema é mostrada na Eq.4.25. As saídas do sistema são apresentadas na Eq. 4.26.

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{k}_i\xi \tag{4.20}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{Bk_i} & -\mathbf{BK} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K_eC} & \mathbf{Bk_i} & \mathbf{A}-\mathbf{BK}-\mathbf{K_eC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \boldsymbol{\xi} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{r} \tag{4.21}$$

$$\mathbf{A_{SO}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{Bk_i} & -\mathbf{BK} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K_eC} & \mathbf{Bk_i} & \mathbf{A}-\mathbf{BK}-\mathbf{K_eC} \end{bmatrix} \tag{4.22}$$

$$\mathbf{B_{SO}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{SO}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\xi}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

$$\mathbf{e_{SO}}(t) = e^{(\mathbf{A_{SO}}t)}\mathbf{e_{SO}}(0) + \mathbf{A_{SO}}^{-1}\left(e^{(\mathbf{A_{SO}}t)} - \mathbf{I}\right)\mathbf{B_{SO}}\mathbf{r} \tag{4.25}$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}]\mathbf{e_{SO}} \tag{4.26}$$

A Figura 4.2 mostra um sistema em problema servo com observador de ordem plena.

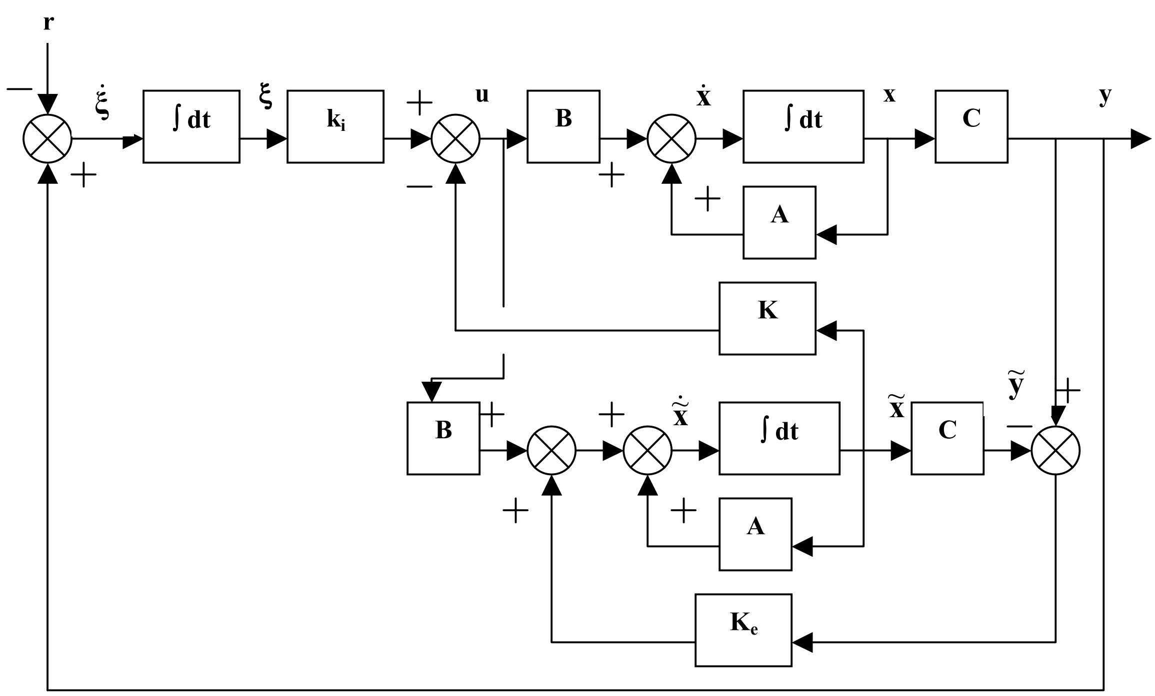


Figura 4.2: Sistema em problema servo com observador de ordem plena

Observador de Ordem Mínima:

Para este estudo serão utilizadas as matrizes apresentadas nas Equações 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43 e 3.44. Foram estimadas as variáveis x_2 e E'q. A referência para este tópico foi OGATA (1993).

Observador de Ordem Mínima: problema regulador

Considerando inicialmente as equações de sistema Eq. 2.1 e Eq. 4.3 e a lei de controle apresentada na Eq. 4.13. O vetor **x** desta equação passa agora a ter a forma da Eq. 4.27. O vetor $\tilde{\mathbf{x}}$ agora é composto de estados medidos e estados estimados, sendo necessário fazer a sua partição, como é mostrado na Eq. 4.28. Sendo assim se faz necessário também fazer uma partição nas matrizes do sistema, que é mostrado nas Equações 4.29, 4.30 e 4.31.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x_a} \\ \mathbf{x_b} \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x_a} \\ \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A_{aa}} & \mathbf{A_{ab}} \\ \mathbf{A_{ba}} & \mathbf{A_{bb}} \end{bmatrix} \tag{4.29}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B_a} \\ \mathbf{B_b} \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0}] \tag{4.31}$$

Onde $\mathbf{x_a}$ é a porção mensurável de **x** e $\mathbf{x_b}$ é a porção não-mensurável de **x**. Considerando o sistema da Eq. 2.1, na forma particionada, pode-se obter a equação da porção mensurável e da porção não-mensurável, mostradas nas Eqs. 4.32 e 4.33.

$$\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{a} = \mathbf{A_{aa}}\mathbf{x_a} + \mathbf{A_{ab}}\mathbf{x_b} + \mathbf{B_a}\mathbf{u} \tag{4.32}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{b} = \mathbf{A_{ba}}\mathbf{x_a} + \mathbf{A_{bb}}\mathbf{x_b} + \mathbf{B_b}\mathbf{u} \tag{4.33}$$

Na Eq. 4.33 pode-se notar que apenas o termo $\mathbf{A_{bb}x_b}$ não é conhecido e que esta equação fornece a dinâmica da porção não-medida do estado. Comparando o observador de ordem plena com o observador de ordem mínima, a Eq. 4.33 expressa a equação de estado

para o observador de ordem mínima e a Eq. 4.34, resultante de simples manipulação da Eq. 4.32, representa a equação de saída do observador de estado de ordem mínima.

$$\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{a} - \mathbf{A}_\mathbf{aa}\mathbf{x}_\mathbf{a} - \mathbf{B}_\mathbf{a}\mathbf{u} = \mathbf{A}_\mathbf{ab}\mathbf{x}_\mathbf{b} \tag{4.34}$$

O projeto do observador de ordem mínima encontra-se baseado na forma de $\tilde{\mathbf{x}}$ como mostrado na Eq. 4.16 e das equações Eq.4.33 e Eq. 4.34. Fazendo-se as substituições e manipulações considerando que $\mathbf{x}_\mathbf{a}$=**y**, obtém-se a Eq. 4.35.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\dot{\mathbf{x}}_\mathbf{a} = (\mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab})(\tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{y}) + [(\mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab})\mathbf{K}_\mathbf{e} + \mathbf{A}_\mathbf{ba} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{aa}]\mathbf{y} + (\mathbf{B}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{B}_\mathbf{a})\mathbf{u} \tag{4.35}$$

Definindo a variável $\boldsymbol{\eta}$ como mostra a Eq. 4.36, e substituindo-a na Eq. 4.35, obtém-se a Eq. 4.37

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{x}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{y} = \mathbf{x}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{x}_\mathbf{a} \Rightarrow \tilde{\boldsymbol{\eta}} = \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{y} = \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{x}_\mathbf{a} \tag{4.36}$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} = (\mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab})\tilde{\boldsymbol{\eta}} + [(\mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab})\mathbf{K}_\mathbf{e} + \mathbf{A}_\mathbf{ba} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{aa}]\mathbf{y} + (\mathbf{B}_\mathbf{b} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{B}_\mathbf{a})\mathbf{u} \tag{4.37}$$

Logo o vetor $\tilde{\mathbf{x}}$ é colocado na forma da Eq. 4.38.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\mathbf{a} \\ \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\mathbf{a} \\ \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{x}_\mathbf{a} \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

Substituindo-se a lei de controle da Eq. 4.13, considerando as Equações 4.37 e 4.38, na Eq. 2.1, por manipulação algébrica obtém-se a Eq. 4.39, onde **e** expressa o desvio entre as variáveis medidas e as variáveis estimadas, como mostrada na Eq. 4.40. A nova lei de controle é mostrada na Eq.4.41 e é uma função da diferença ($\mathbf{x}$- $\tilde{\mathbf{x}}$).

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{x} + \mathbf{BK\Omega}(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) \tag{4.39}$$

$$(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\mathbf{a} \\ \mathbf{x}_\mathbf{b} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{x}_\mathbf{a} \\ \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{x}_\mathbf{b} - \tilde{\mathbf{x}}_\mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}\mathbf{e} = \mathbf{\Omega e} \tag{4.40}$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}[\mathbf{x} + \mathbf{\Omega}(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}})] \tag{4.41}$$

Partindo-se das equações Eq. 4.33 e Eq. 4.34, pode-se obter **e** na forma apresentada na Eq. 4.42 que define a dinâmica do erro dos estados estimados.

$$\dot{\mathbf{e}}_M = (\mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab})\mathbf{e}_M \tag{4.42}$$

Fazendo a composição do sistema com a dinâmica do erro dos estados estimados obtém-se a Eq. 4.43. A matriz $\mathbf{A}_\mathbf{om}$ é apresentada na Eq. 4.44. A resolução deste problema é mostrada na Eq. 4.45. A Eq. 4.46 mostra as saídas do sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\tilde{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{BK\Omega} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_\mathbf{bb} - \mathbf{K}_\mathbf{e}\mathbf{A}_\mathbf{ab} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

$$\mathbf{A_{om}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A - BK} & \mathbf{BK\Omega} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A_{bb} - K_e A_{ab}} \end{bmatrix} \tag{4.44}$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \tilde{\mathbf{x}}(t) \end{bmatrix} = e^{(\mathbf{A_{om}} t)} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \tilde{\mathbf{x}}(0) \end{bmatrix} \tag{4.45}$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \tilde{\mathbf{x}} \end{bmatrix} \tag{4.46}$$

A Figura 4.3 mostra a configuração do sistema para a presença de um observador de ordem mínima ou ordem reduzida.

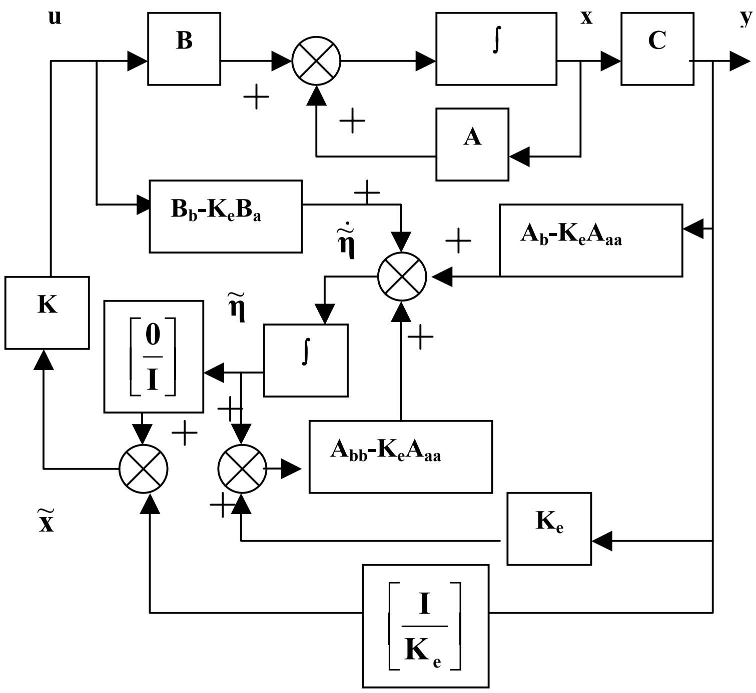


Figura 4.3: configuração do sistema considerando um observador de ordem mínima ou reduzida.

Observador de Ordem Mínima: problema servo

Considerando inicialmente as equações de sistema Eq. 2.1 e Eq. 56, a lei de controle apresentada na Eq. 4.20. O vetor $\mathbf{x}$ é aproximado pelo vetor $\tilde{\mathbf{x}}$, composto de estados medidos e estados estimados, como indicam as matrizes particionadas mostradas nas equações Eq. 4.29, Eq. 4.30 e Eq. 4.31. Utilizando as equações Eq. 4.36 e Eq. 4.37 é possível compor um novo sistema como mostrado na Eq. 4.47 que consta das variáveis de estado, o desvio das saídas em relação ao *setpoint* e o erro das variáveis estimadas e que pode ser reescrito na

forma da Eq. 4.48. As matrizes $\mathbf{A_{SOM}}$ e $\mathbf{B_{SOM}}$ são mostradas nas equações Eq. 4.49 e 4.50. A resolução deste problema encontra-se na Eq. 4.51. A Eq. 4.52 mostra as saídas do sistema.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\xi} \\ \dot{\mathbf{e}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{B}k_i & \mathbf{BK\Omega} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A_{bb}} - \mathbf{K_e A_{ab}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \\ \mathbf{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{r} \tag{4.47}$$

$$\dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{SOM}} = \mathbf{A_{SOM}} \mathbf{e} + \mathbf{B_{SOM}} \mathbf{r} \tag{4.48}$$

$$\mathbf{A_{SOM}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{B}k_i & \mathbf{BK\Omega} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A_{bb}} - \mathbf{K_e A_{ab}} \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

$$\mathbf{B_{SOM}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.50}$$

$$\mathbf{e_{SOM}}(t) = e^{(\mathbf{A_{SOM}} t)} \mathbf{e_{SOM}}(0) + \mathbf{A_{SOM}}^{-1} \left(e^{\mathbf{A_{SOM}} t} - \mathbf{I} \right) \mathbf{B_{SOM}} \mathbf{r} \tag{4.51}$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}] \mathbf{e_{SOM}} \tag{4.52}$$

A Figura 4.4 mostra a configuração do sistema para a presença de um observador de ordem mínima ou ordem reduzida.

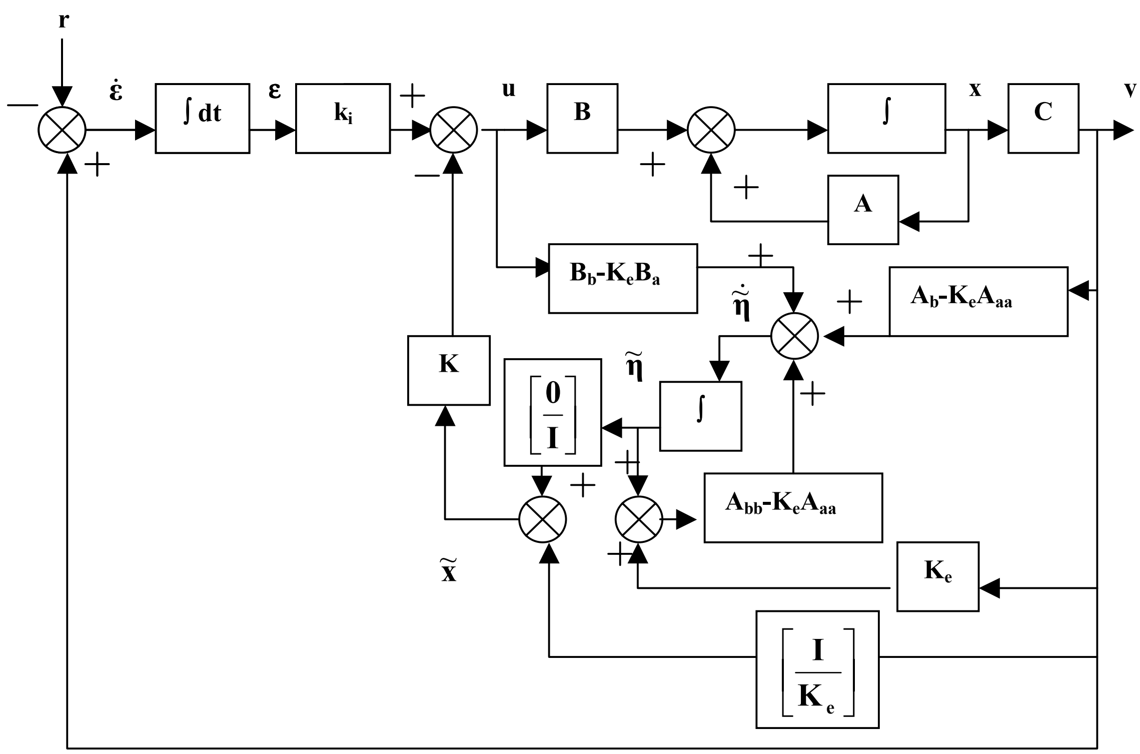


Figura 4.4: Configuração do sistema considerando um observador de ordem mínima ou reduzida em um problema servo.

4.2.4 Entrada de carga no sistema ou perturbação não medida

A demonstração será feita tomando como base o problema servo, com modelagem perfeita e sem observador de estado. Para observadores de ordem plena e mínima o processo e idêntico. Considerando-se o sistema na forma da Eq. 4.53, as saídas na forma da Eq. 4.54, a lei de controle representada pela Eq. 4.55, definida no estudo do problema servo, e o vetor de desvio das saídas representadas pela Eq. 4.56. Após substituições e rearranjo algébrico obtém-se a Eq. 4.57.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{d}(t) \tag{4.53}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \tag{4.54}$$

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{k}_i\xi \tag{4.55}$$

$$\xi = \mathbf{r} - \mathbf{y} = \mathbf{r} - \mathbf{C}\mathbf{x} \tag{4.56}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\xi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K} & \mathbf{B}\mathbf{k}_i \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \xi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \mathbf{r} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{d} \tag{4.57}$$

A fim de se avaliar apenas o comportamento submetido a uma perturbação não medida, ou seja, a uma entrada de carga, será considerado que não há variação de *setpoint* e portanto $\mathbf{r} = \mathbf{0}$. Desta forma as matrizes A_L, B_L e C_L são mostradas nas Eqs. 4.58, 4.59 e 4.60.

$$\mathbf{A}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K} & \mathbf{B}\mathbf{k}_i \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.58}$$

$$\mathbf{B}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.59}$$

$$\mathbf{C}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \tag{4.60}$$

A resolução da Eq 4.61. é mostrada na Eq. 4.62, como indicou a Eq. 2.15.

$$\dot{\mathbf{e}}_L = \mathbf{A}_L\mathbf{e}_L + \mathbf{B}_L\mathbf{d} \tag{4.61}$$

$$\mathbf{e}_L(t) = e^{\mathbf{A}_L t}\mathbf{e}_L(0) + \mathbf{A}_L^{-1}\left(e^{\mathbf{A}_L t} - \mathbf{I}\right)\mathbf{B}_L\mathbf{d} \tag{4.62}$$

Onde $\mathbf{e}_L$ é a composição dos estados e dos desvios e mostra a dinâmica do sistema. $\mathbf{e}_L(0)$ é o conjunto de condições iniciais. As saídas são obtidas na Eq. 4.63. A Figura 4.5 ilustra a configuração do sistema.

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}\mathbf{e}_S \tag{4.63}$$

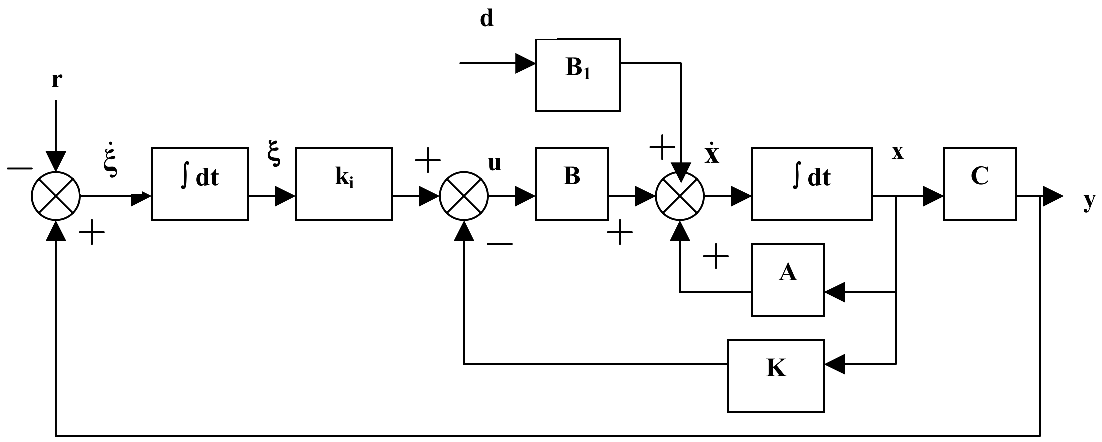


Figura 4.5: Configuração do sistema sujeito a uma perturbação não medida.

4.2.5 Questão de modelagem

Considerando a modelagem perfeita as matrizes de ganho dos controladores e a matriz de ganho do observador são aplicadas no modelo em que elas foram calculadas, ou seja as matrizes **A**, **B**, **C** e **D**. Para o problema de desvio planta/modelo, as matrizes de realimentação calculadas baseadas nas matrizes do modelo (**A**, **B**, **C** e **D**) são aplicadas a sistemas que apresentam desvios em alguns parâmetros e constituindo as matrizes $\mathbf{A_d}$, $\mathbf{B_d}$, $\mathbf{C_d}$ e $\mathbf{D_d}$. Este problema visa principalmente avaliar a estabilidade e robustez do controlador quando este estiver sujeito a erros de modelagem ou alterações dos parâmetros durante a operação da planta. Para este processo os parâmetros K_1 e K_3 expressam condições de variação de carga e variação de condição operativa/erros de modelagem respectivamente, sendo os mais significativos para este tipo de estudo, como se pode observar nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 (ANEXO B). O problema de desvio planta/modelo com variação em K_1 será avaliado nos limites deste parâmetro, como indica a Tabela B.4 (ANEXO B). Para o parâmetro K_3 será considerada uma variação de 50% acima e abaixo, indicado também na tabela B.4. A Figura 4.6 ilustra esta situação.

4.3 O Controlador e os Observadores

O projeto das matrizes de ganho dos controladores e dos observadores foi calculado utilizando-se a fórmula de Ackermann, mostradas nas Equações 2.4 e 2.10, tendo como condição necessária para o cálculo destas matrizes que o sistema seja completamente controlável e completamente observável. Supondo um sistema representado pela Eq. 2.1 e uma lei de controle representada pela Eq. 2.2, após as substituições a dinâmica do sistema será dada pela Eq. 4.64. Admitindo que os pólos da malha fechada sejam $s=\chi_1$, $s=\chi_2$,..., $s=\chi_n$, a equação característica desejada será dada pela Eq. 4.65.

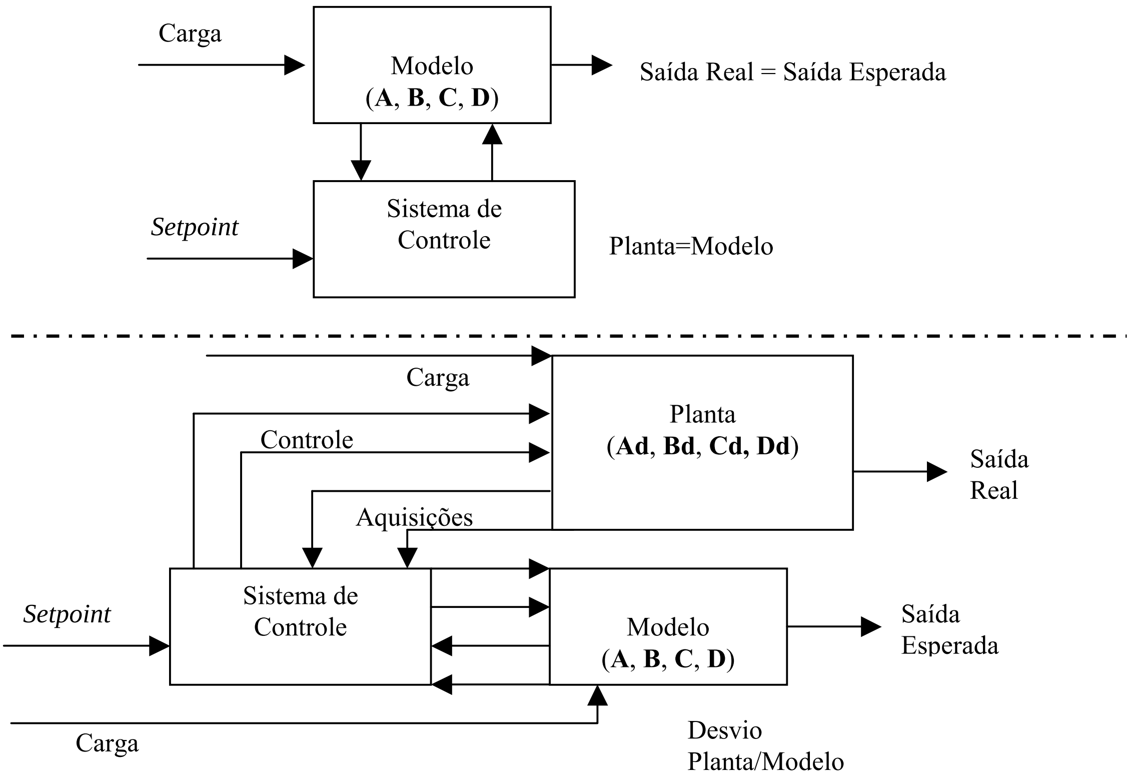


Figura 4.6: Modelagem perfeita x desvio planta/modelo.

$$\mathbf{A}_N = \mathbf{A} - \mathbf{BK} \tag{4.64}$$

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}| = |s\mathbf{I} - \mathbf{A}_N| = (s-\chi_1)(s-\chi_2)\ldots(s-\chi_n) = s^n + \varsigma_1 s^{n-1} + \ldots + \varsigma_{n-1}s + \varsigma_n = 0 \tag{4.65}$$

Uma vez que o teorema de Cayley-Hamilton estabelece que a matriz $\mathbf{A}_N$ satisfaz a sua própria equação característica, após manipulações algébricas, obtém-se a Eq. 2.4 reescrita na Eq. 4.66.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & \ldots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \ldots & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{\Theta}(\mathbf{A}) \tag{4.66}$$

Para o observador de estado, a matriz de realimentação é obtida por este mesmo procedimento, considerando o problema dual e obtendo-se a Eq. 2.10 reescrita na Eq. 4.67.

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{\Theta}(\mathbf{A})\left(\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{CA} & \ldots & \mathbf{C}(\mathbf{A})^{n-1} \end{bmatrix}^{-1}\right)^T \begin{bmatrix} 0 & \ldots & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{4.67}$$

Todos os sistemas devem ser manipulados de forma a se encaixar nesta formulação. Para o problema servo, os pólos adicionais relativos as variáveis de erro de *setpoint*, devem ter dinâmicas tais que a estabilidade global seja obedecida. Para o projeto de observadores, o ideal é que a dinâmica do observador seja muito mais rápida que a dinâmica do sistema. Uma regra empírica consiste em escolher uma resposta do observador pelo menos duas a cinco vezes mais rápida do que a resposta do sistema

4.4 Modelagem em espaço de estados com os controladores atuais

Como foi posto na introdução deste capítulo, por não se dispor de um estudo mais detalhado sobre a influência de cada pólo no comportamento do sistema dinâmico, e a dificuldade de obtenção de uma resposta satisfatória a partir de simulações, foi feita uma modelagem em espaço de estados considerando a presença dos reguladores atualmente em funcionamento. Foram obtidos os autovalores do modelo a fim de ser um ponto de partida para o estudo de colocação de pólos.

As equações Eq. 4.68, Eq. 4.69, Eq. 4.70, Eq. 4.71 e Eq. 4.72, Eq. 4.73 e Eq. 4.74 mostram o sistema obtido. As variáveis x_1 e x_5 são parâmetros dos reguladores de velocidade e tensão respectivamente. A resposta deste modelo é compatível com o modelo em função de transferência mostrada na Figura 3.5.

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau} & 0 & \left(\frac{Td}{bp\tau^2}-\frac{1}{bp.\tau}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{Tw} & -\frac{2}{Tw} & -\frac{6Td}{\tau Twbp} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{H} & \frac{1}{2H} & \frac{Td}{\tau bpH}-\frac{D}{(2H)} & -\frac{K_1}{2H} & 0 & 0 & -\frac{K_2}{2H} \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_5K_AK_{AI}}{T_I} & -\frac{1}{T_I} & 0 & -\frac{K_6K_AK_{AI}}{T_I} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_5K_AK_{AI}}{T_E} & \frac{1}{T_E} & -\frac{\varphi}{T_E} & -\frac{K_6K_AK_{AP}}{T_E} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & -\frac{1}{K_3T'_{do}} \end{bmatrix} \tag{4.68}$$

$$\mathbf{B}^{T} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{Td}{\tau^{2}}\right) & \frac{6Td}{\tau Tw} & -\frac{Td}{\tau H} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{A}K_{AI}}{T_{I}} & \frac{K_{A}K_{AP}}{T_{E}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

$$\mathbf{B}_{1}{}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.70)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{5} & 0 & 0 & K_{6} \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

$$\mathbf{x}^{T} = \begin{bmatrix} x_{1} & PM & \omega & \delta & x_{5} & V_{F} & E'_{q} \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

$$\mathbf{u}^{T} = \begin{bmatrix} \omega_{REF} & V_{REF} & L \end{bmatrix} \quad (4.73)$$

$$\mathbf{y}^{T} = \begin{bmatrix} \delta & VT \end{bmatrix} \quad (4.74)$$

onde φ e τ são dados pelas equações Eq.4.75 e 4.76. SE é o parâmetro linearizado que leva em consideração os efeitos da saturação da excitação e como os demais parâmetros foram comentado no tópico de modelagem do capítulo 3.

$$\varphi = SE - K_{E} \quad (4.75)$$

$$\tau = T + Td\left(1 + \frac{bt}{bp}\right) \quad (4.76)$$

A partir da matriz apresentada na Eq. 4.68, foram obtidos os autovalores para este sistema, mostrados na Eq. 4.77.

$$\mathbf{MF} = \begin{bmatrix} -0{,}0260 & -0{,}0556 & -0{,}3308 + 7{,}4149i & -0{,}3308 - 7{,}4149i & -0{,}4628 & -2{,}4746 & -4{,}3829 \end{bmatrix} \quad (4.77)$$

Uma vez que o sistema forneceu um vetor de 7 posições e o sistema a ser controlado possui 6 estados é necessário desprezar um autovalor do vetor encontrado neste tópico. Para isto foram feitas várias simulações no sistema a ser controlado utilizando-se de valores baseados no conjunto encontrado neste tópico, desprezando um por vez e também avaliando em torno dos autovalores onde o vetor da Eq. 4.78 mostrou a melhor resposta para o sistema.

$$\mathbf{MF} = \begin{bmatrix} -0{,}0260 & -0{,}0556 & -0{,}3308 & -0{,}4628 & -2{,}4746 & -4{,}3829 \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

4.5 Resultados

A busca dos controladores que satisfazem as condições de operação do processo iniciou-se pelo problema regulador e a seguir o problema servo. Apenas as melhores respostas destes casos foram submetidas à presença de observadores de estado e problemas de desvio planta/modelo.

A Tabela 4.1 mostra o comportamento da planta para perturbação de 1% em cada estado separadamente em problema regulador como o autovalor desejado aleatório, apenas para avaliar qual variação de estado se mostra mais severa para o processo. Pode-se perceber que a variação no estado x_3 se mostrou mais severa. Porém esta variação é avaliada no projeto do controlador pela entrada de carga (**d**), logo foi escolhida a configuração de perturbações composta por um estado que influi diretamente em cada laço (x_1 e x_5).

TABELA 4.1: SAÍDAS DO SISTEMA PARA PROBLEMA REGULADOR COM $\mathbf{r} = [-1\ \ -2\ \ -3\ \ -4\ \ -5\ \ -6]$ E VARIAÇÃO EM 1% EM CADA ESTADO.

Δx_n	y_1	y_2
x_1	-0,023	0,010
x_2	0,012	$-3{,}10^{-3}$
x_3	0,800	-0,300
x_4	$-3{,}10^{-3}$	$-1{,}10^{-3}$
x_5	$0{,}5.\ 10^{-4}$	$1{,}5.10^{-4}$
x_6	-0,015	$4{,}10^{-3}$
x_1 e x_5	0,010	-0,025

A planta foi submetida a variações de 1% nas variáveis x_1 e x_5 dentro do problema regulador, enquanto para problemas servo a ação se deu na malha de controle 1 de atuação do regulador de velocidade, na malha de controle 2 de atuação do regulador de tensão, onde o sistema deve exibir um comportamento que leve ao novo *setpoint* e entrada de uma carga ou perturbação não medida (**d**) no sistema, com valores também de 1%. Este valor foi escolhido porque representa oscilação a que a máquina encontra-se permanentemente sujeita. Uma vez que o modelo linearizado é obtido para a faixa de operação nominal e considerando o princípio da superposição, qualquer valor acima ou abaixo deste será apenas uma composição linear da resposta exibida para a simulação nos valores considerados. A lista de simulação completa encontra-se no ANEXO C. Na Tabela 4.2 encontram-se os valores de pólos a que se referem os gráficos apresentados a seguir.

Os gráficos mostrados a seguir referem-se aos valores de ajuste dados na Tabela 4.2. Serão apresentados neste capítulo apenas os casos: modelagem perfeita, sem observador de estado, nos problemas servo e regulador e desvio planta/modelo, com observador de estado de ordem plena, nos problemas servo e regulador. Os gráficos a seguir tiveram o degrau ou a carga aplicados no instante t = 26 s.

TABELA 4.2: AUTOVALORES SELECIONADOS DOS CONTROLADORES PROJETADOS POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS.

Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; problema regulador sem/com observador pleno
r=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; problema Servo sem/com observador pleno
rs=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; observador pleno
rop=r*100
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; regulador com observador mínimo
r=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328]
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; servo com observador mínimo
rs=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100]
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; observador mínimo
rom=[-11 -0,3328]*100

4.5.1 Problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita:

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as curvas dos estados e saída / sinais de controle no tempo respectivamente para a melhor condição encontrada para o controlador no universo de pesquisa representado pela Tabela B.1 com autovalores selecionados mostrados na Tabela 4.2, atuando em problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita sujeito à condição inicial x_0.

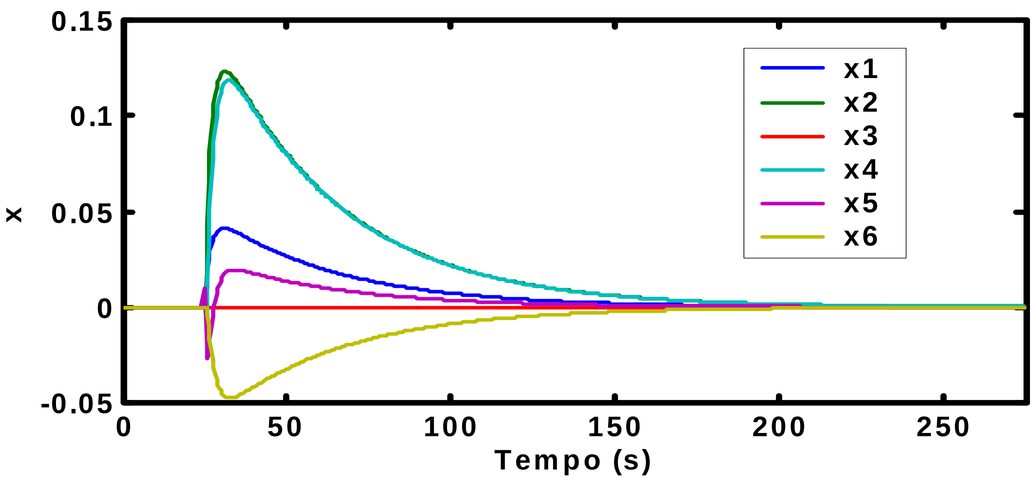
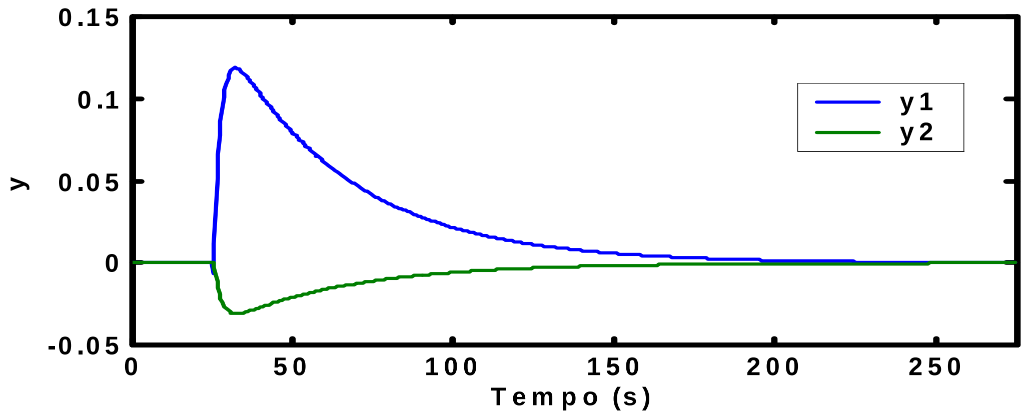
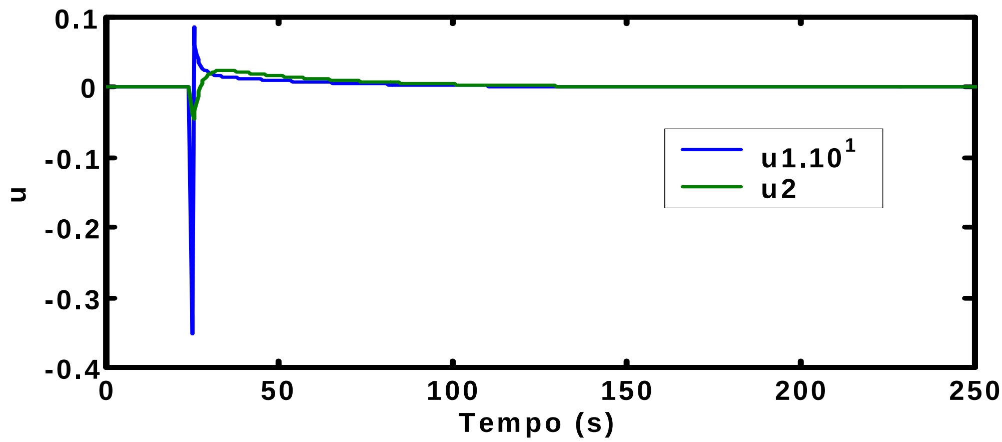


Figura 4.7 – Trajetória das estados (**x**) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos.



(a)



(b)

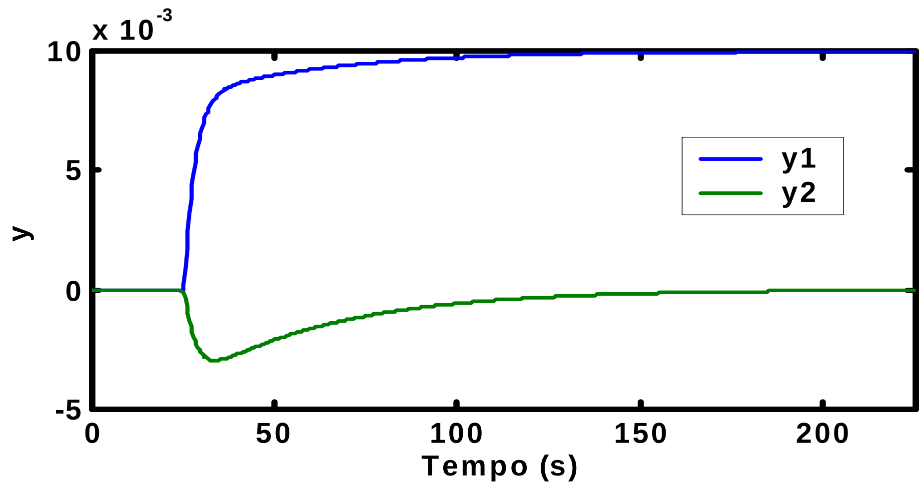
Figura 4.8 – Curvas das saídas (a) e dos sinais de controle (b) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos.

A Figura 4.8 mostra que as saídas do sistema retornaram para o valor inicial, comportamento esperado para um problema regulador e que os sinais de controle apresentam também uma configuração típica para este problema e com valores aceitáveis. A Figura 4.7 mostra a trajetória dos estados típica para um problema regulador. Da composição destes estados é que resultam as saídas do sistema.

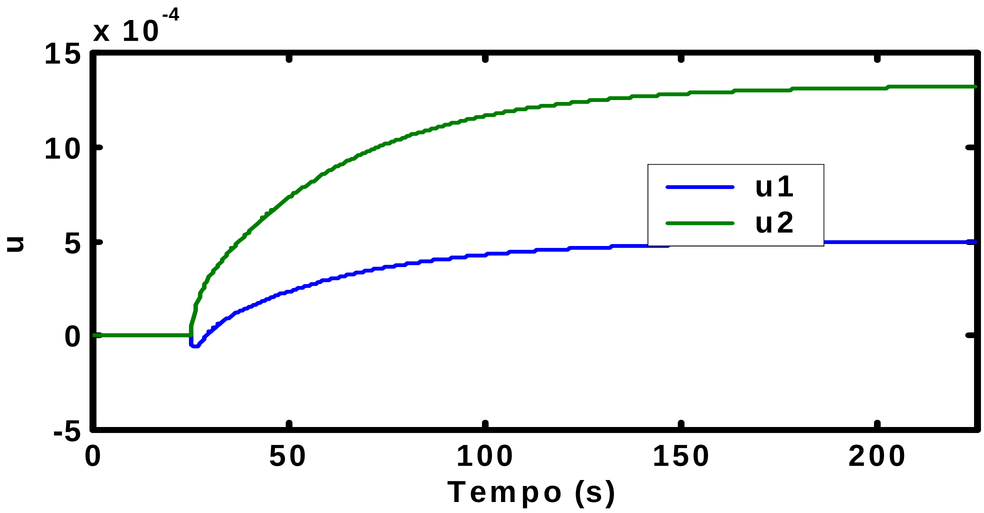
4.5.2 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita:

A Figura 4.9 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para a melhor condição encontrada para o controlador no universo de pesquisa representado pela Tabela B.1 com autovalores selecionados mostrados na Tabela 4.2, atuando em problema

servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras 4.10 e 4.11 mostram os resultados para degrau de 0,01 na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 no sistema respectivamente.



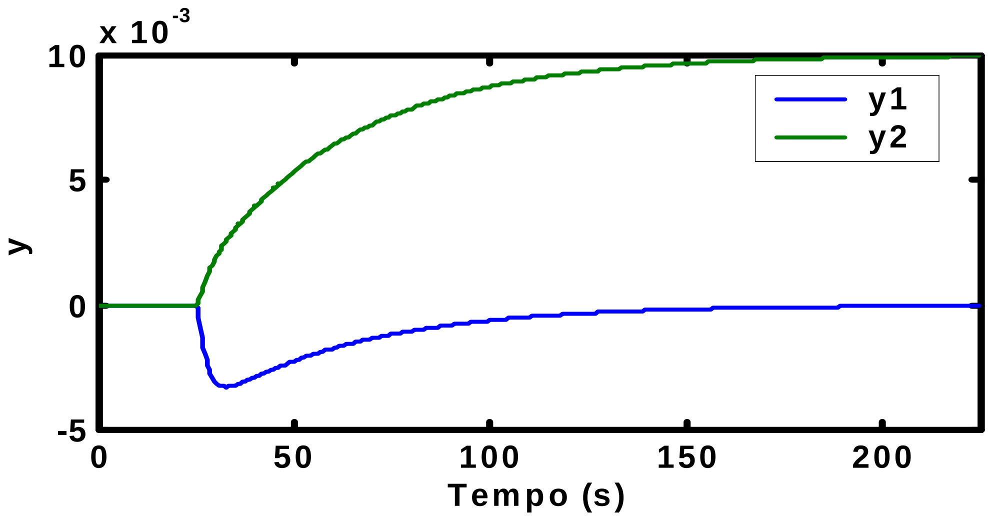
(a)



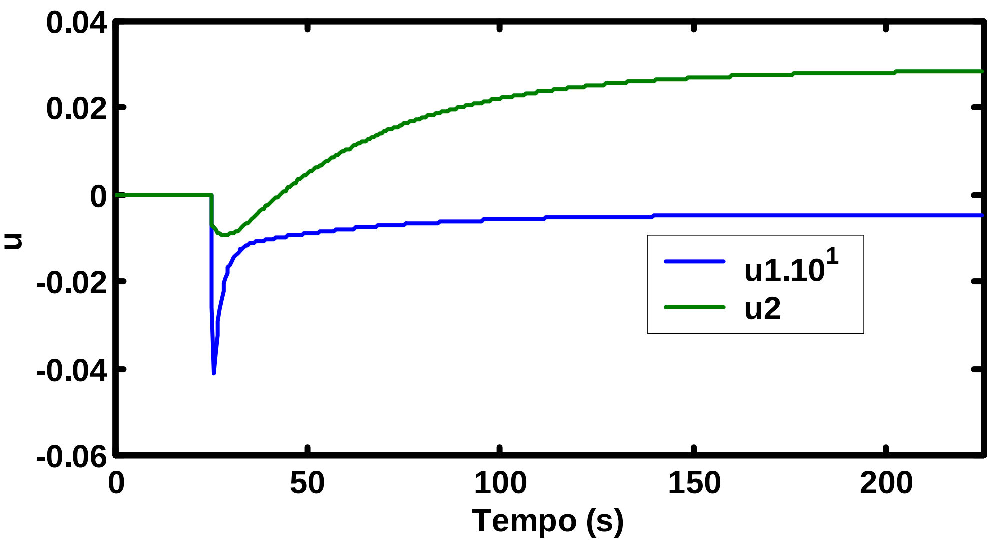
(b)

Figura 4.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Pode-se observar na Figura 4.9 que as saídas comportam-se como desejado, ou seja aquela em que houve variação de *setpoint* atinge o valor desejado e a outra saída é ajustada no valor inicial. Os sinais de controle para este caso apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.



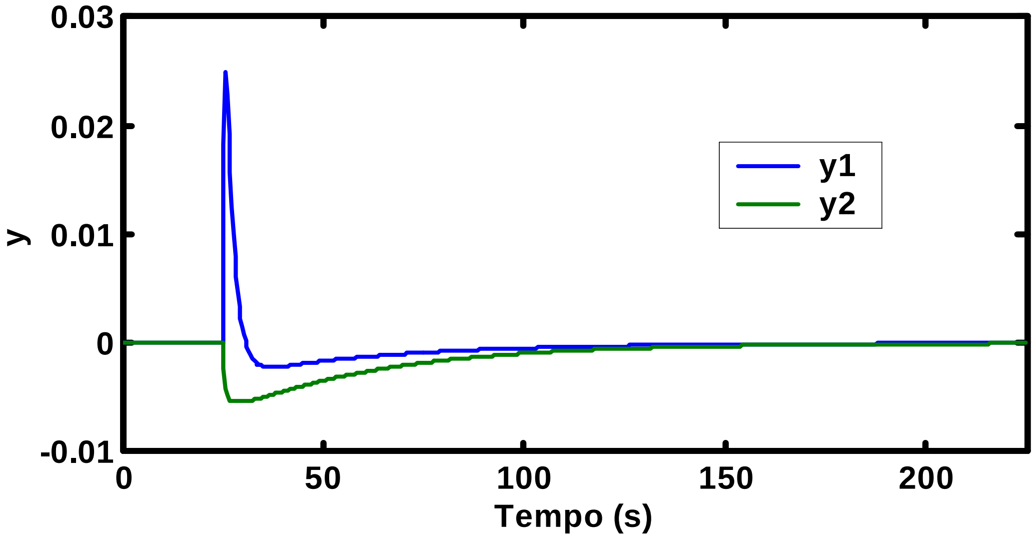
(a)



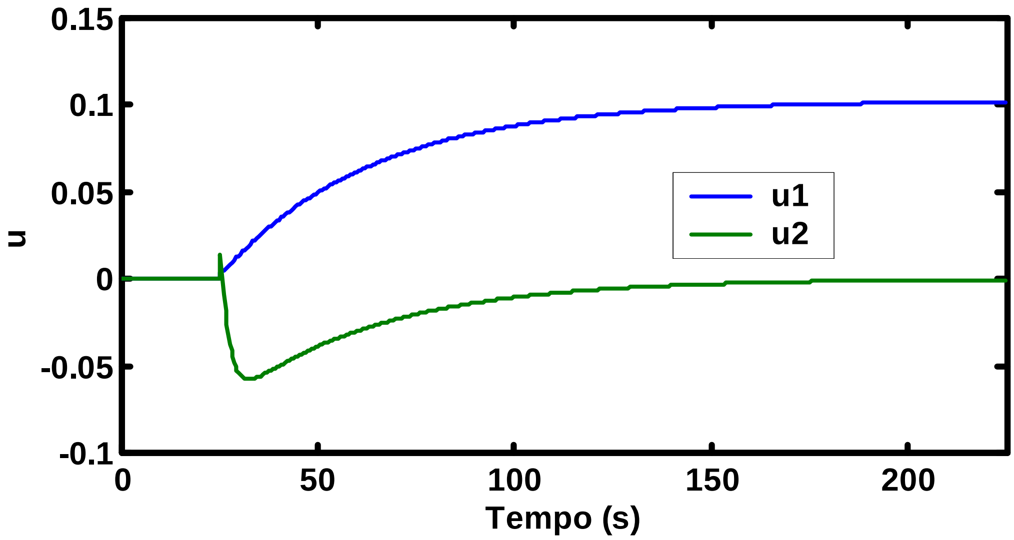
(b)

Figura 4.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura 4.10 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.



(a)



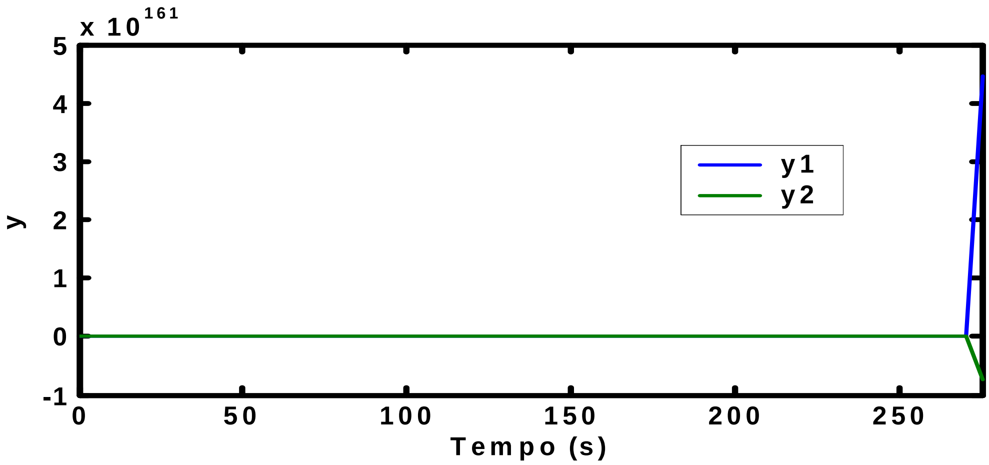
(b)

Figura 4.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu.

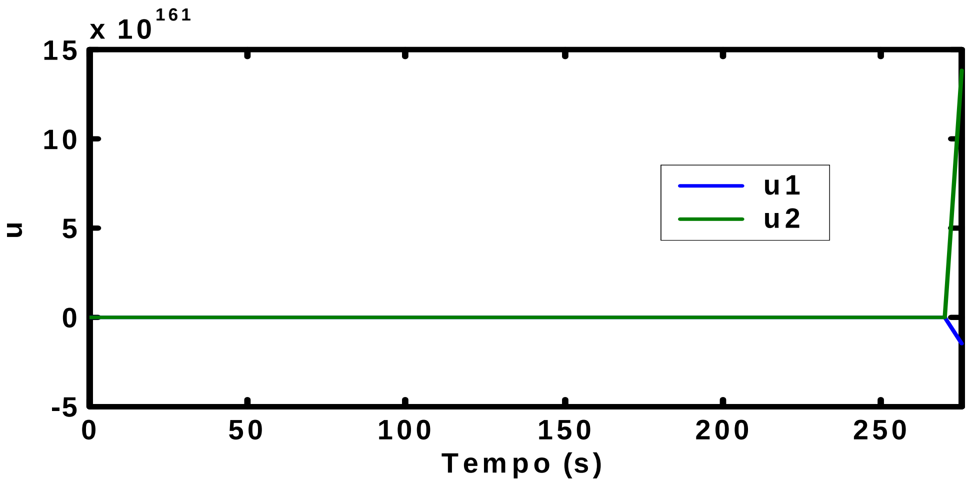
Na Figura 4.11 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado frente a uma entrada de carga no sistema, ou seja, são ajustadas de forma a retornar no valor inicial ou de ajuste de *setpoint*. O sinal de controle u2 (tensão de campo) apresenta valor razoável, porém para u1 (abertura do distribuidor) o esforço apresenta-se demasiadamente excessivo.

4.5.3 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo:

A Figura 4.12 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente para controlador atuando em problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo.



(a)



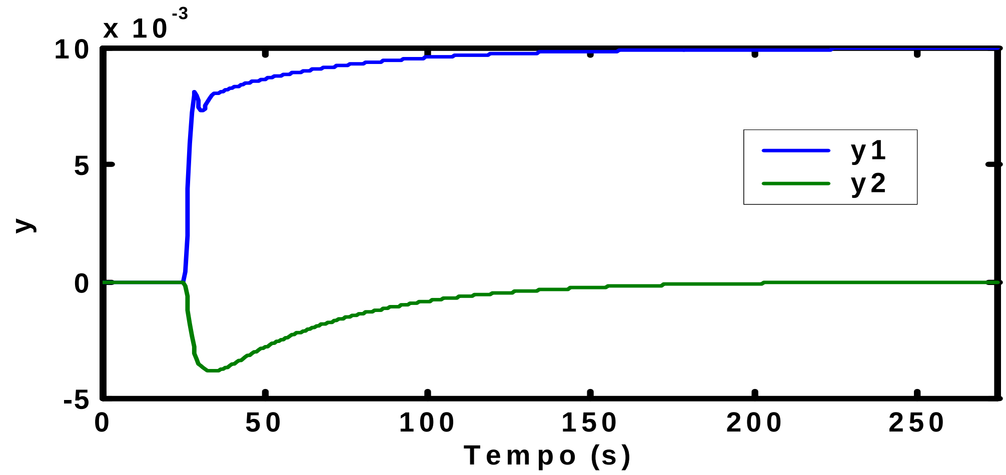
(b)

Figura 4.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem plena, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos.

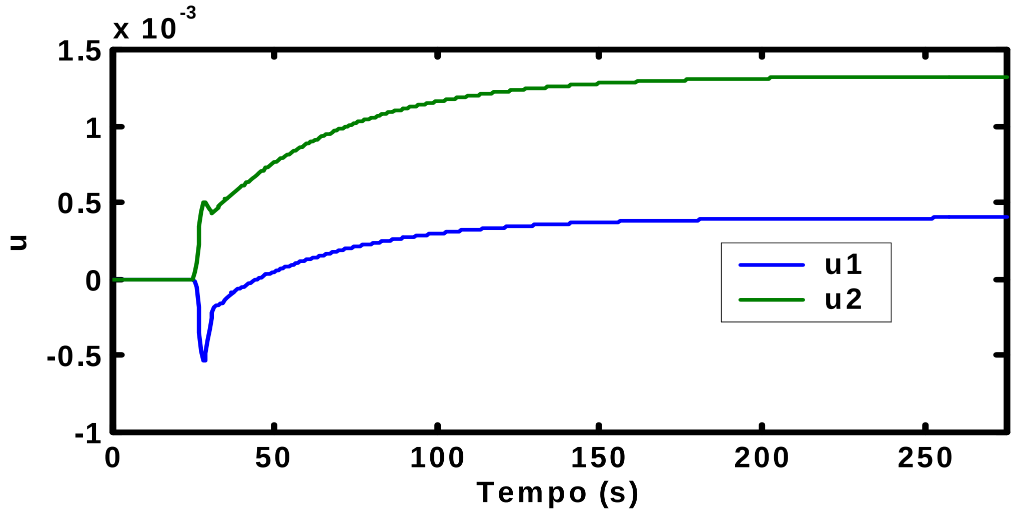
O sistema apresentou-se instável para este caso. Logo, as saídas e os sinais de controle não atendem às condições do processo.

4.5.4 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo:

A Figura 4.13 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para controlador atuando em problema servo, com observador de estado de ordem plena e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



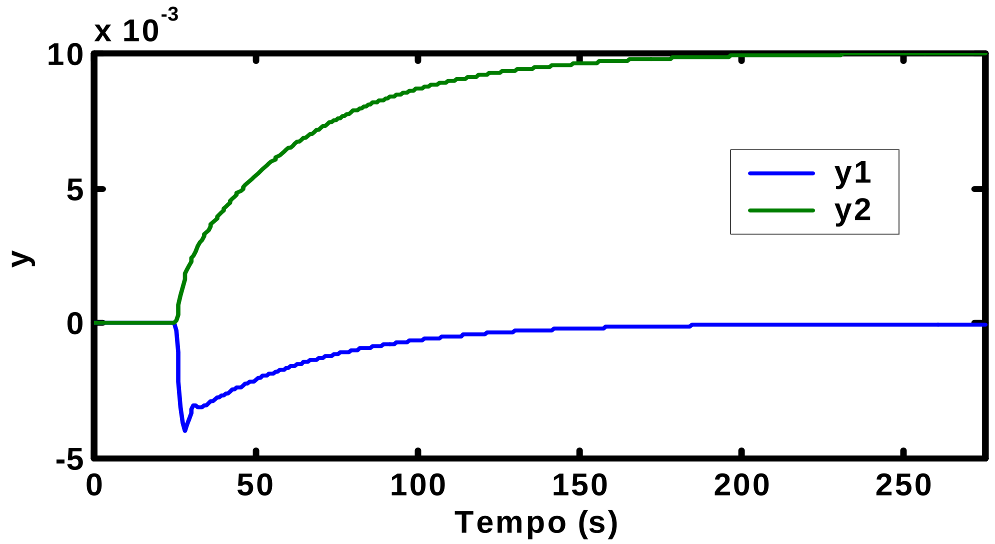
(a)



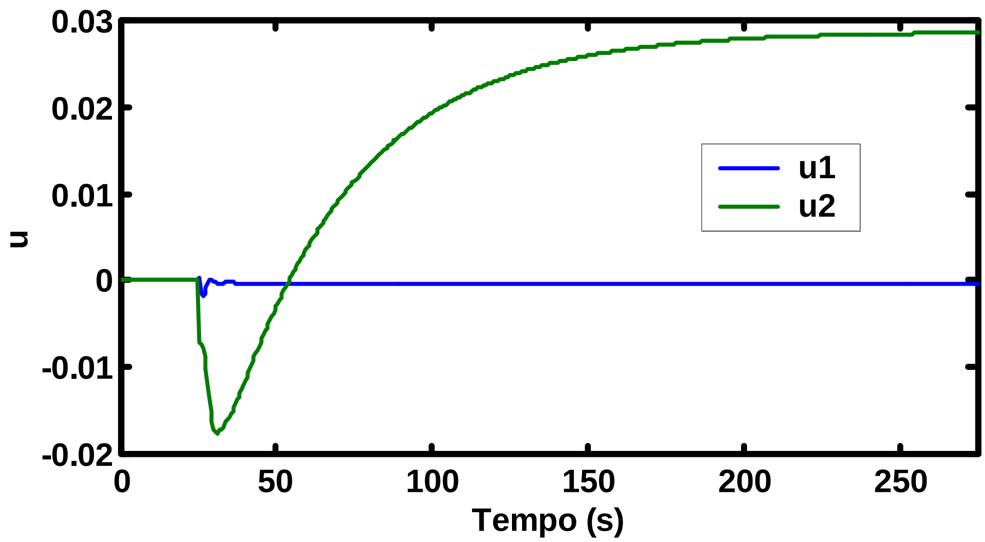
(b)

Figura 4.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

As saídas e os sinais de controle para este problema atendem as condições do processo.



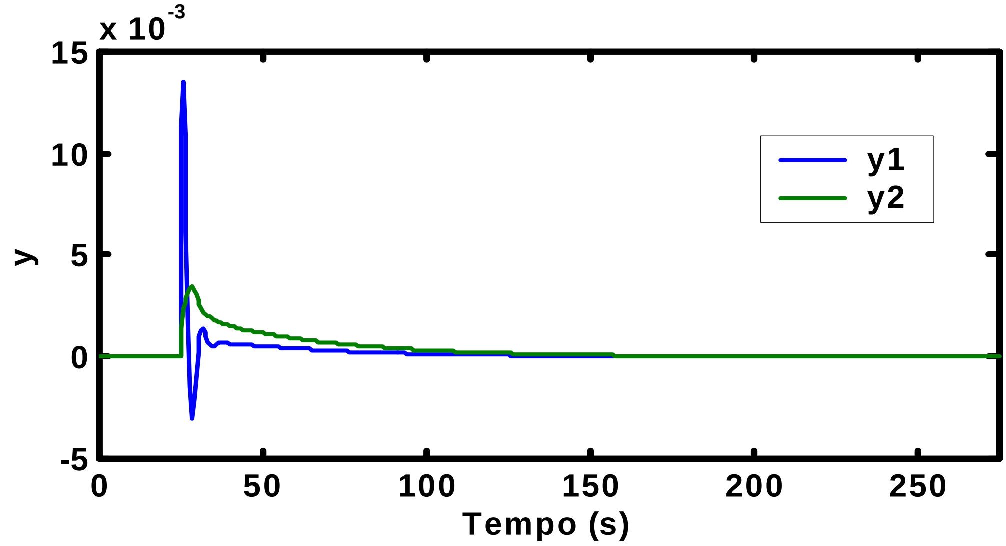
(a)



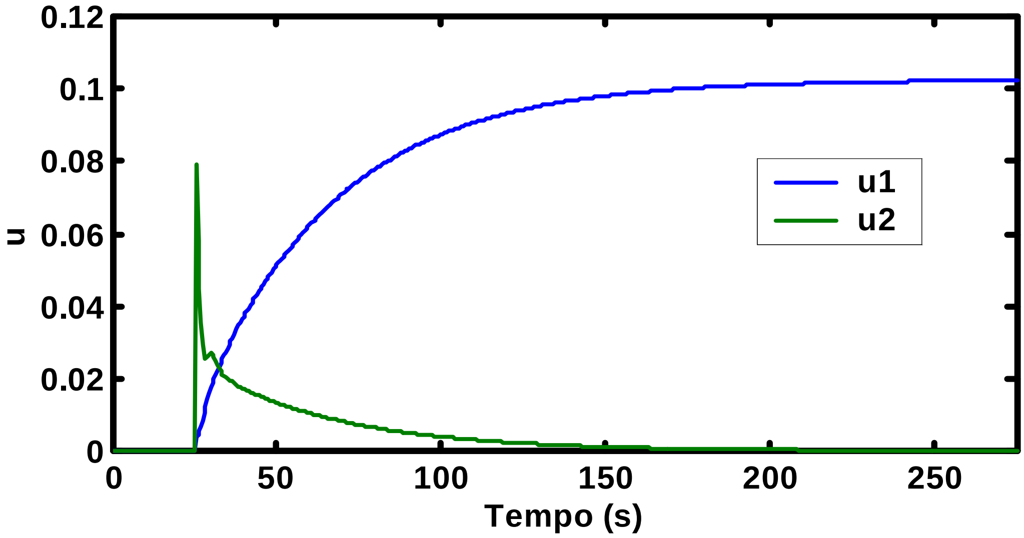
(b)

Figura 4.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. . Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

As saídas e os sinais de controle para este problema atendem as condições do processo, como apresentou a Figura 4.14.



(a)



(b)

Figura 4.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu.

A Figura 4.15 mostra que as saídas e o sinal de controle u2 atendem as condições do processo. O sinal de controle u1 mostrou-se exagerado e incoerente com a carga.

4.6 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de projetar controladores usando a técnica de controle por colocação de pólos usando o modelo do processo em espaço de estados. Foi elaborada e apresentada toda a formulação utilizada no projeto de controladores por controle moderno. Foi feito um estudo da planta com os reguladores atualmente em funcionamento de forma a balizar a localização dos pólos desejados. Foram projetados inúmeros controladores e destes selecionados o de melhor resultados no universo de estudo, representado pela Tabela B.1, encontrando-se os gráficos referentes ao problema mais significativo no corpo deste capítulo. Varias foram as dificuldades encontradas: os controladores apresentaram esforços excessivos quando a entrada de carga ou que não atendem ao processo, necessidade de inúmeras simulações a fim de se obter um controlador que atenda às condições do processo, controladores instáveis frente a desvios planta modelo. Espera-se contornar todos estes problemas ou a maioria deles usando a técnicas de projeto de controlador por controle ótimo apresentada no capítulo 5.

CAPÍTULO 5

5. PROJETO DE CONTROLADOR POR CONTROLE ÓTIMO

5.1 Introdução

Para projetar um sistema com controle ótimo é necessário encontrar inicialmente uma regra a fim de balizar a decisão relativa às variáveis de controle inerentes a este processo no instante presente. Serão estabelecidas certas restrições, tais como a minimização de algumas medidas de desvio de certas variáveis em relação a um comportamento ideal definido previamente. Isto é usualmente desenvolvido pela escolha de um índice de performance que é uma função cujo valor será considerado para ser o indicativo de quão boa é a performance do sistema. Este índice representa um objetivo desejado e as decisões tomadas e ações implementadas são realizadas baseadas nas condições ótimas propostas. O controlador será o melhor no sentido de atender às condições impostas e de levar o processo para onde se deseja da melhor forma, sem que isto signifique ser este controlador o melhor possível. Após a definição deste índice o problema de controle se transforma em um problema de otimização onde as variáveis de decisão, ou sinais de controle, serão encontradas pela resolução do sistema formado.

A escolha do melhor índice de performance para um dado sistema é muito difícil. É desejável que o critério de otimização esteja baseado no ponto de vista da aplicação prática e não apenas na formulação matemática. Deve haver um compromisso entre a avaliação significativa do desempenho do sistema e o tratamento matemático. Os problemas de otimização de sistemas de controle são formulados seguindo algumas informações, tais como equação da função objetivo, restrições do problema, índice de performance, parâmetros do sistema e classe de vetores permissíveis de controle. A solução de um problema ótimo de controle é a determinação de um vetor ótimo para as entradas do sistema ($\mathbf{u}$) que depende da natureza do índice de performance, da natureza das restrições, do estado inicial e das saídas iniciais e das saídas desejadas.

Partindo-se de um sistema no estado inicial, $\mathbf{x}(0)$, o vetor $\mathbf{u}$ encontrado pela otimização de um índice transferirá o sistema de uma determinada região do espaço de estados para uma outra do espaço agora região desejada. É importante notar que algumas combinações

de planta tais como estados desejados, índices de performance e restrições, podem tornar o controle ótimo impossível.

A sistemática de estudo realizada por esta técnica é a mesma descrita no capítulo 4.

5.2 Formulação

A formulação utilizada neste capítulo foi rigorosamente a mesma demonstrada no capítulo 4. A diferença está, única e exclusivamente, nas matrizes de ganho, que são obtidas segundo a dedução mostrada no tópico 5.3.

5.3 O controlador e os observadores

Considerando o sistema mostrado pela Eq. 2.1, a lei de controle apresentada na Eq. 2.3 e o índice de performance mostrado na Eq. 5.1 foi formada a nova função objetivo, denominada Hamiltoniano e mostrada na Eq. 5.2, segundo o método dos multiplicadores de Lagrange, onde $\boldsymbol{\lambda}$ é o conjunto de multiplicadores de Lagrange. Diferenciando-se esta equação com relação as variáveis, obtêm-se as equações canônicas, mostradas nas equações 5.3, 5.4 e 5.5.

$$J = \frac{1}{2}\int_0^t \left[\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{u}\right]dt \tag{5.1}$$

$$\mathbf{H_H} = \frac{1}{2}\mathbf{x}^T\mathbf{Q}\mathbf{x}\frac{1}{2}\mathbf{u}^T\mathbf{R}\mathbf{u} + \boldsymbol{\lambda}^T\left[\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}\right] \tag{5.2}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H_H}}{\partial \boldsymbol{\lambda}^T} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} = \dot{\mathbf{x}} \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H_H}}{\partial \mathbf{x}^T} = \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{A}^T\boldsymbol{\lambda} = -\dot{\boldsymbol{\lambda}} \tag{5.4}$$

$$\frac{\partial \mathbf{H_H}}{\partial \mathbf{u}^T} = \mathbf{R}\mathbf{u} + \mathbf{B}^T\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \tag{5.5}$$

Isolando-se **u** na Eq. 5.5 e substituindo na Eq. 5.3, obtém-se Eq. 5.6.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\boldsymbol{\lambda} \text{ com } \mathbf{x}(0)=\mathbf{c} \tag{5.6}$$

OGATA (1993) nos indica a hipótese de que $\boldsymbol{\lambda}$ varia linearmente com **x**, como mostra a Eq. 5.7, onde **P** é uma matriz na ordem de **x.**

$$\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{P}\mathbf{x} \tag{5.7}$$

Diferenciando está equação, obtém a Eq. 5.8.

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} = \dot{\mathbf{P}}\mathbf{x} + \mathbf{P}\dot{\mathbf{x}} \tag{5.8}$$

Substituindo-se na Eq. 5.4, considerando a Eq. 2.1 para $\dot{\mathbf{x}}$ e a Eq. 5.5 para **u,** fazendo-se as devidas simplificações obtém-se a Equação 5.9.

$$\mathbf{Qx} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{PA} - \mathbf{PBR}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} + \dot{\mathbf{P}} = \mathbf{0} \tag{5.9}$$

Considerando que **P** é normalmente invariante no tempo, obtém-se a Eq. 5.10, que é a Equação de Riccati.

$$\mathbf{Qx} + \mathbf{A}^T\mathbf{P} + \mathbf{PA} - \mathbf{PBR}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P} = \mathbf{0} \tag{5.10}$$

A solução desta equação seguida das substituições necessárias fornecerá o sinal de controle mostrado na Eq. 5.5 para a realimentação de estado **u,** indicada na Eq. 5.11. A dedução desta equação pode também ser feita a partir da teoria da estabilidade segundo Lyapunov.

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{Kx}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{Px}(t) \tag{5.11}$$

5.4 Resultados

A busca dos controladores que satisfazem as condições de operação do processo, da mesma forma que no capítulo 4, iniciou-se pelo problema regulador e a seguir o problema servo. Apenas as melhores respostas destes casos foram submetidas à presença de observadores de estado e problemas de desvio planta/modelo. As variações a que a planta foi submetida foram às mesmas descritas no tópico 4.5. A lista completa de simulações para este tópico encontra-se no ANEXO C. A Tabela 5.1 mostra os valores das matrizes de penalização que forneceram os melhores resultados no universo de pesquisa representado pela Tabela C.1.

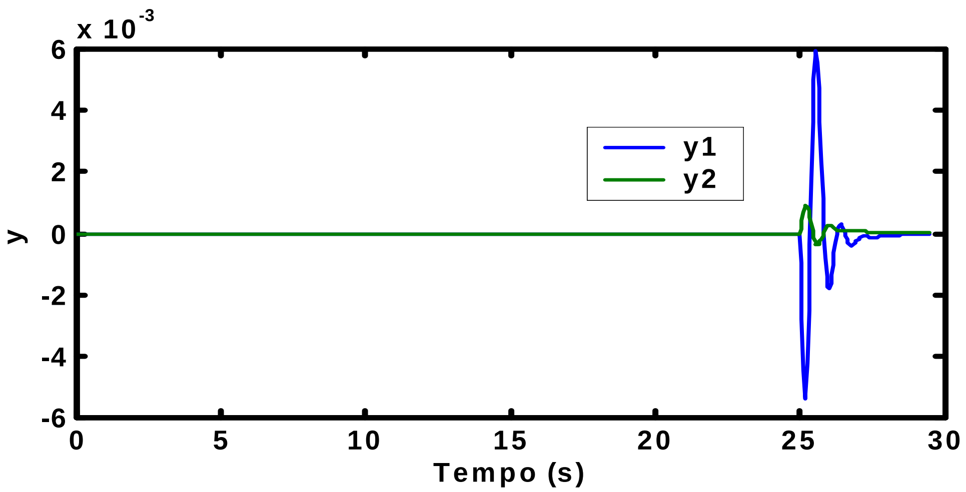
TABELA 5.1: MATRIZES DE PENALIZAÇÃO SELECIONADA NO PROJETO DE CONTROLADORES POR CONTROLE ÓTIMO.

Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; regulador sem observadores
$R= I_2$ e $Q=I_6$
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; servo sem observadores
$Rs= I_2$ e $Qs=I_8$
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; servo e regulador com observador pleno
$R= I_2$ e $Q=I_6$ e $Rs= I_2$ e $Qs=I_8$ e $Qop =I_6*100$
Modelagem perfeita e desvio planta/modelo; servo e regulador com observador mínimo
$R= I_2$ e $Q=I_6$ e $Rs= I_2$ e $Qs=I_8$ e $Qom= I_2*100$

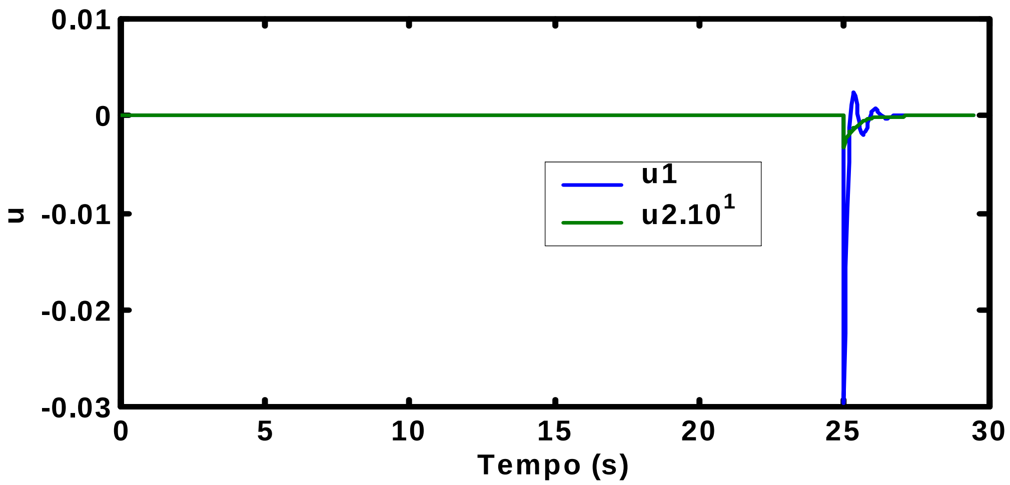
Os gráficos apresentados a seguir referem-se as matrizes da Tabelas 5.1. Os gráficos a seguir tiveram o degrau ou a carga aplicados no instante t = 26 s.

5.4.1 Problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita:

A Figuras 5.1 mostra as curvas das saídas e sinais de controle e a Figura 5.2 apresenta a trajetória dos estados no tempo respectivamente para controlador atuando em problema regulador, sem observador de estado e com modelagem perfeita sujeito a condição inicial x_0.



(a)



(b)

Figura 5.1 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo.

A Figura 5.1 mostra que as saídas do sistema retornaram para o valor inicial, comportamentos esperados para um problema regulador e os sinais de controle se encontram na configuração típica para este problema e com valores aceitáveis.

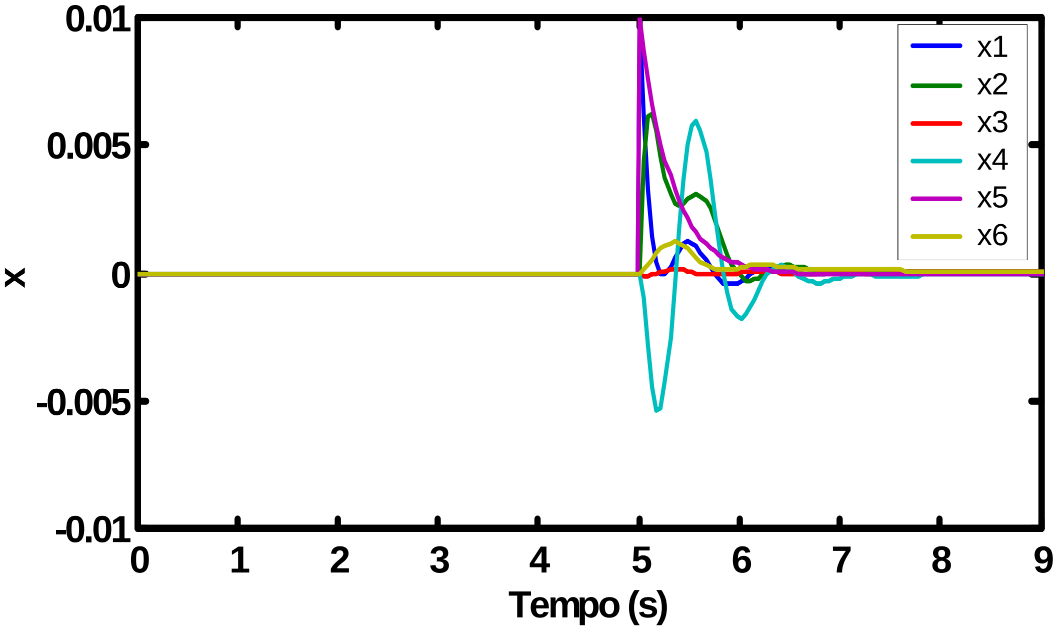
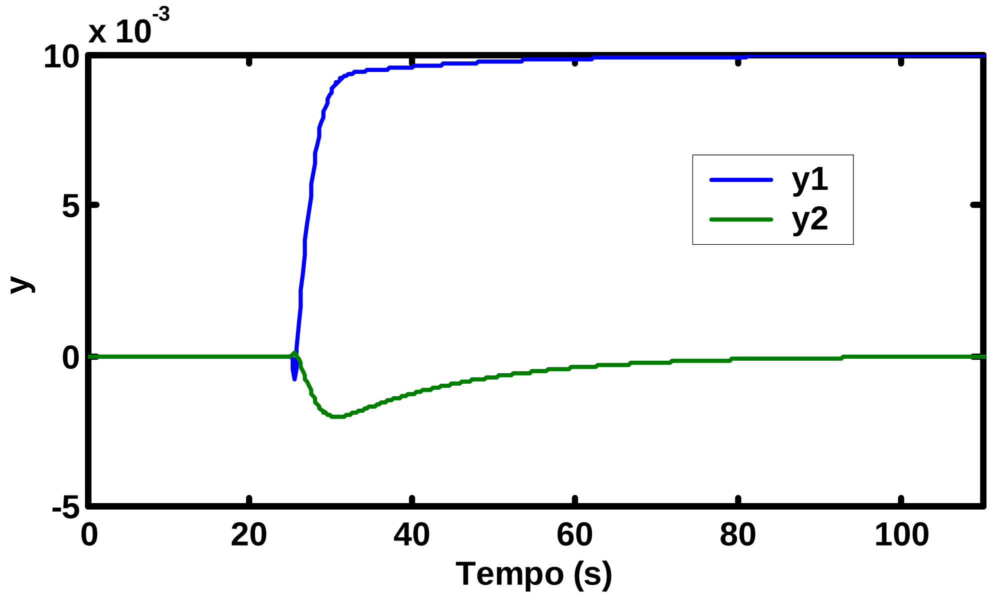


Figura 5.2 – Trajetória das estados (**x**) para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo.

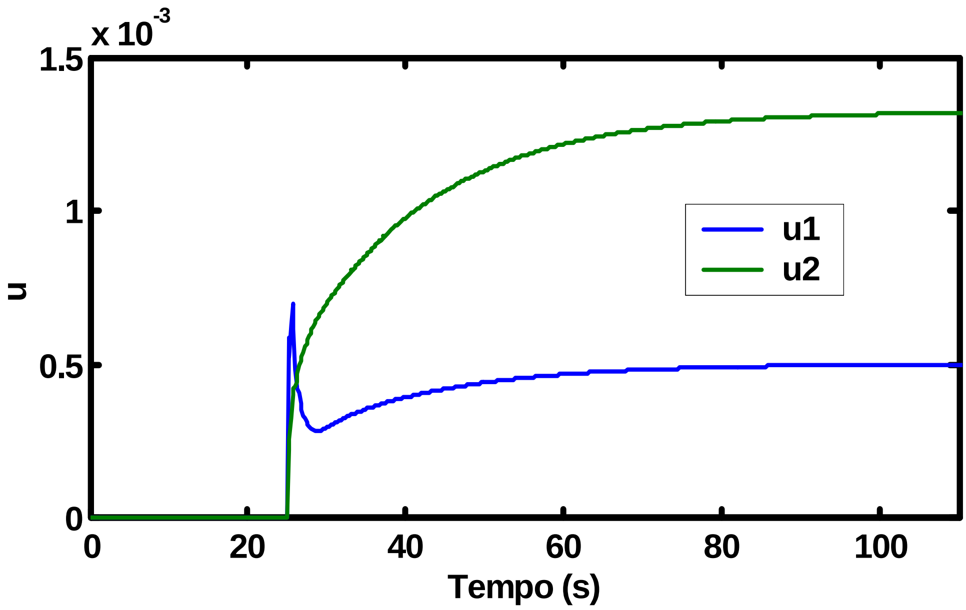
A Figura 5.2 mostra a trajetória dos estados típica para um problema regulador. Da composição destes estados é que resultam as saídas do sistema.

5.4.2 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita:

A Figura 5.3 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para o controlador atuando em problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade para δ. As Figuras 5.4 e 5.5 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão para V_T e carga (**d**) de 0,01 no sistema respectivamente.



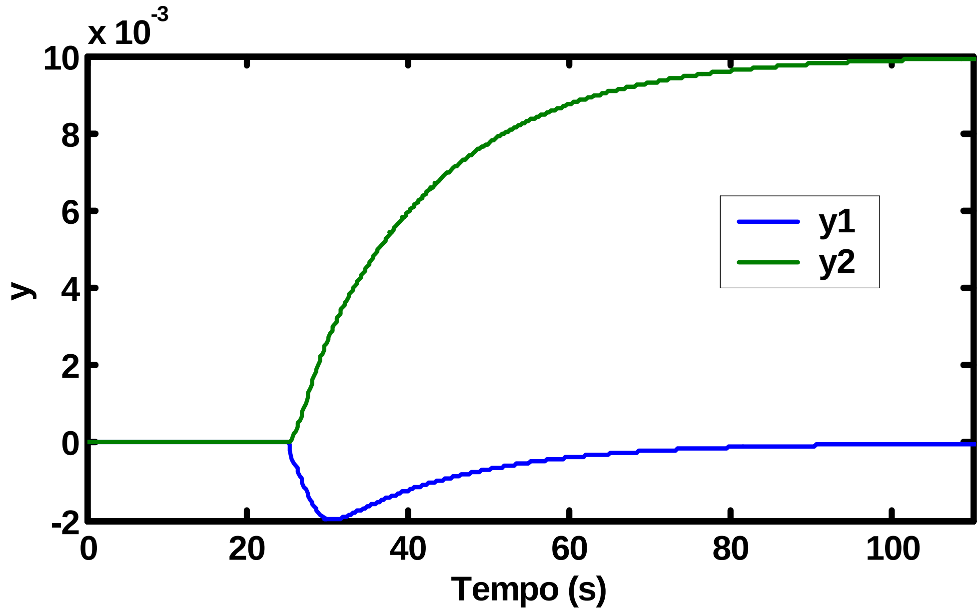
(a)



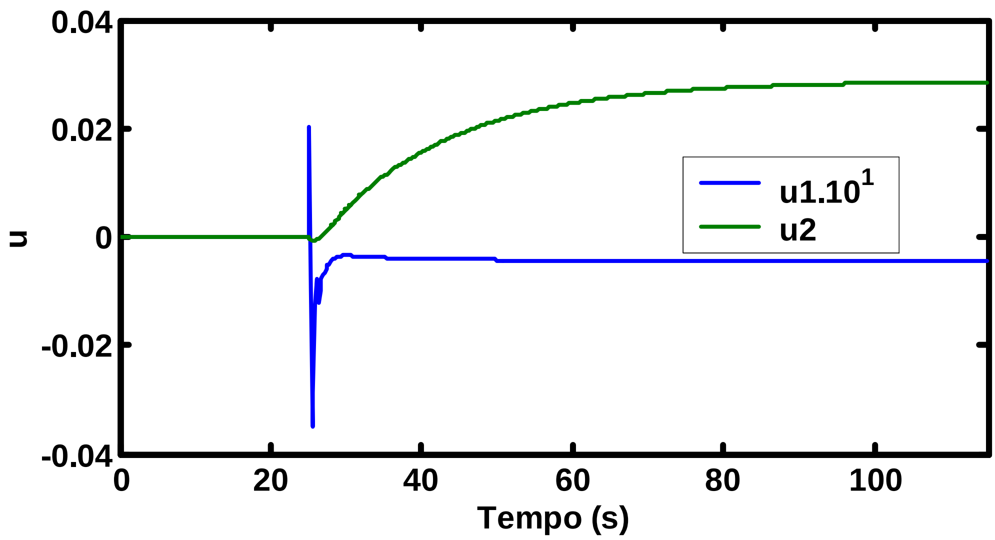
(b)

Figura 5.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Pode-se observar na Figura 5.3 que as saídas comportam-se como desejado, ou seja aquela saída em que houve variação de *setpoint* atinge o valor desejado e a outra saída é ajustada no valor inicial. Os sinais de controle para este caso apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.



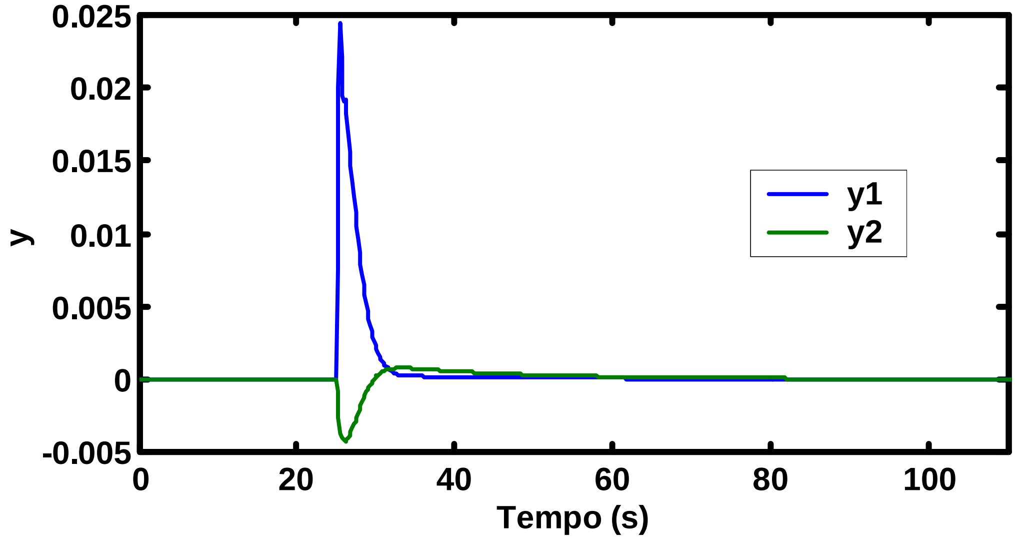
(a)



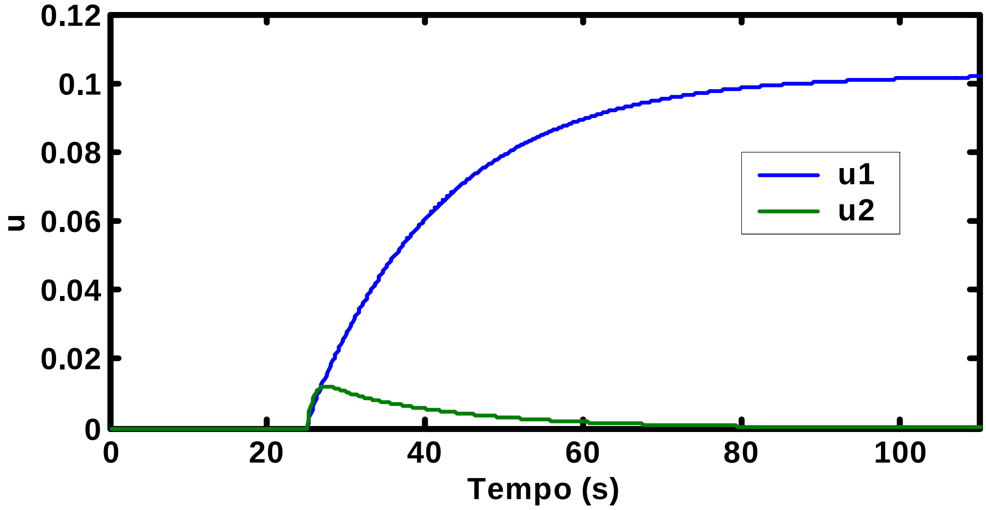
(b)

Figura 5.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura 5.4 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.



(a)



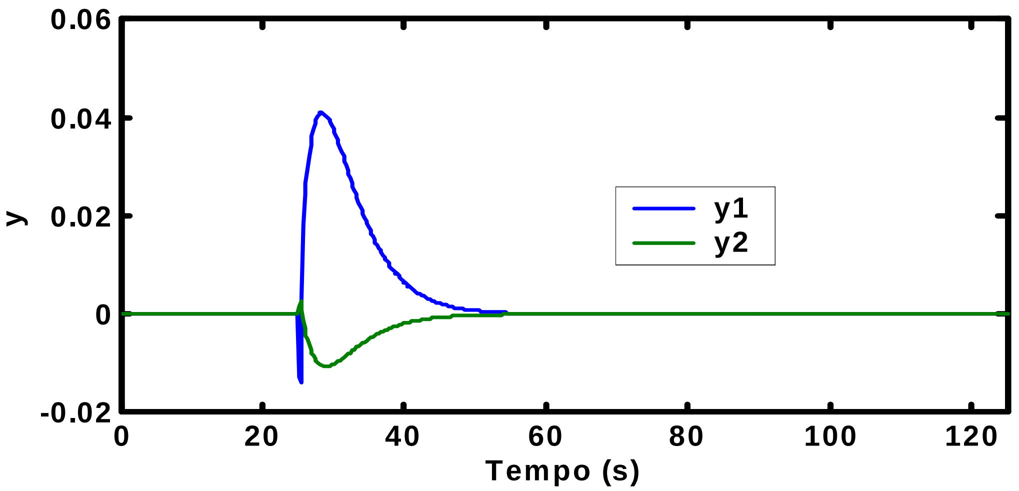
(b)

Figura 5.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

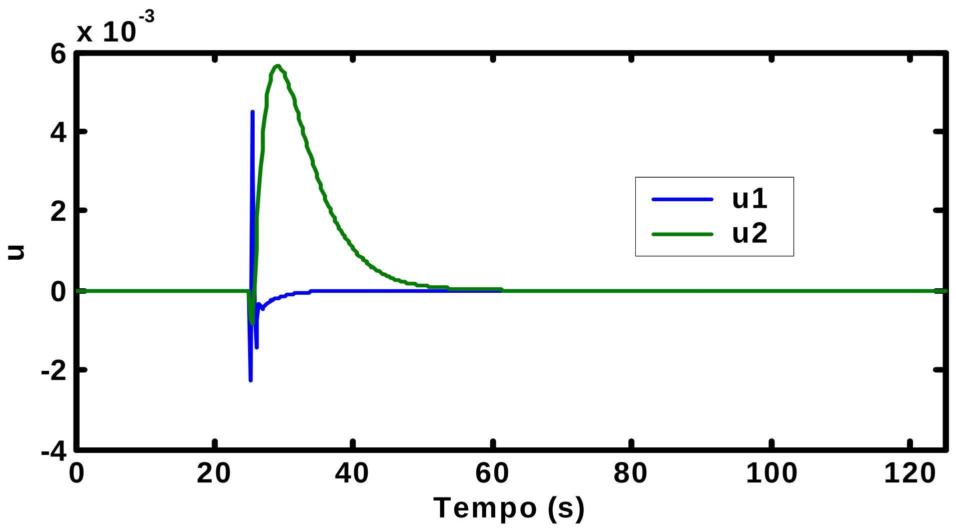
Na Figura 5.5 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado frente a uma entrada de carga no sistema, ou seja, são ajustadas de forma a retornar no valor inicial ou de ajuste de *setpoint*. O sinal de controle u2 (tensão de campo) apresenta valor razoável, porém para u1 (abertura do distribuidor) o esforço apresenta-se demasiadamente excessivo, da mesma forma que o controlador calculado por colocação de pólos.

5.4.3 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo:

A Figura 5.6 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente para controlador atuando em problema regulador, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo.



(a)



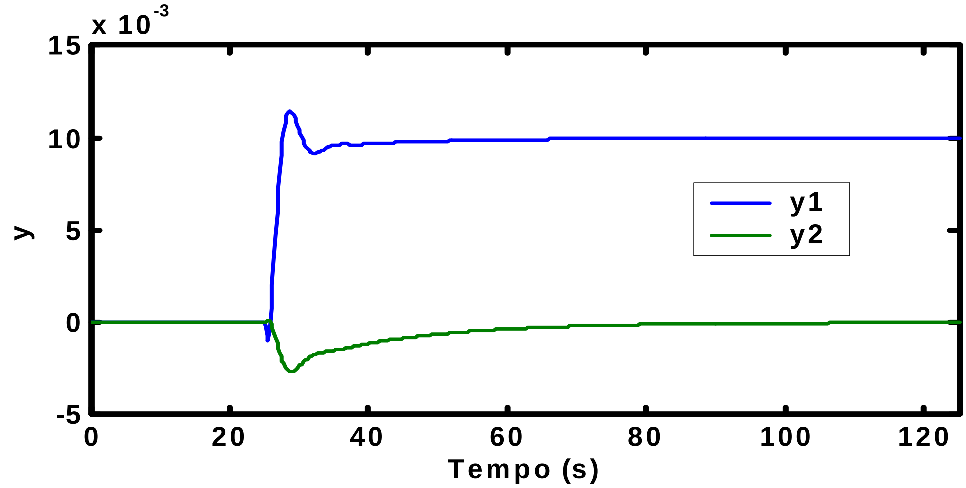
(b)

Figura 5.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo.

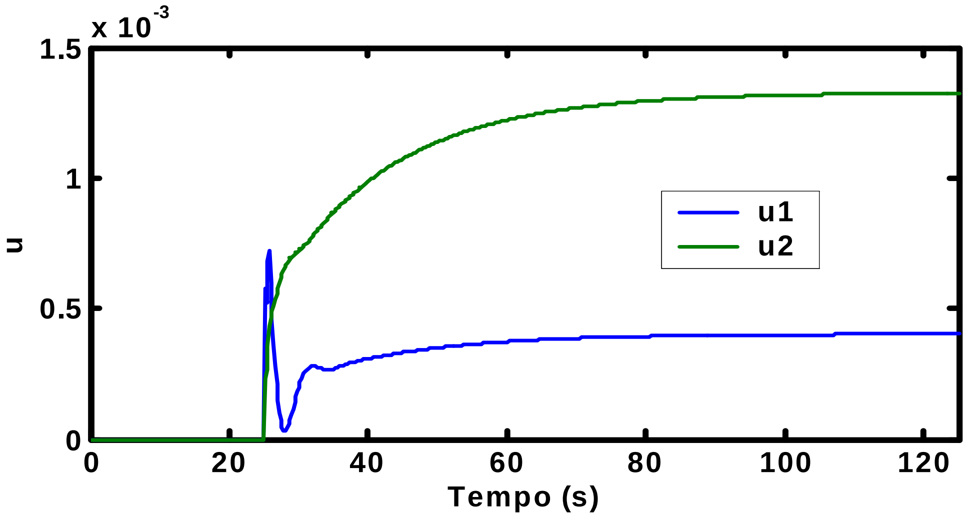
As saídas e sinais de controle apresentados na Figura 5.6 satisfazem ao controle do processo.

5.4.4 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo:

A Figura 5.7 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para controlador atuando em problema servo, com observador de estado de ordem plena e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade para δ. As Figuras 5.8 e 5.9 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão para V_T e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



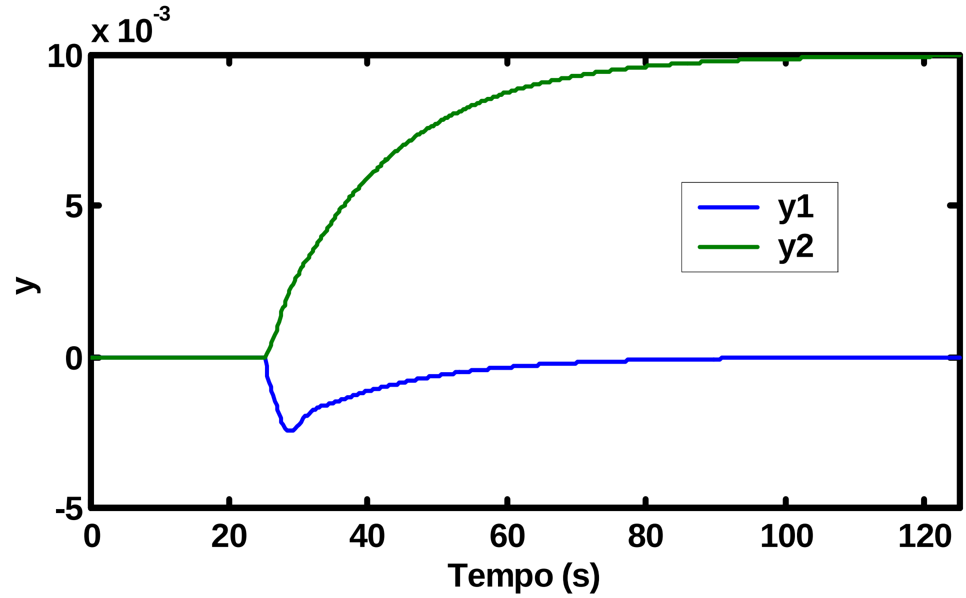
(a)



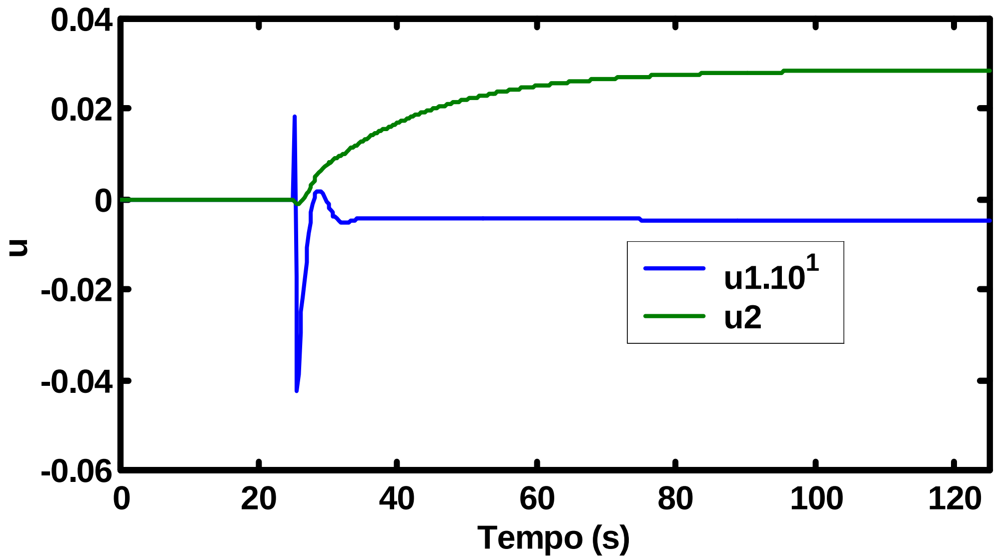
(b)

Figura 5.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

As saídas e sinais de controle apresentados na Figura 5.7 satisfazem ao controle do processo.



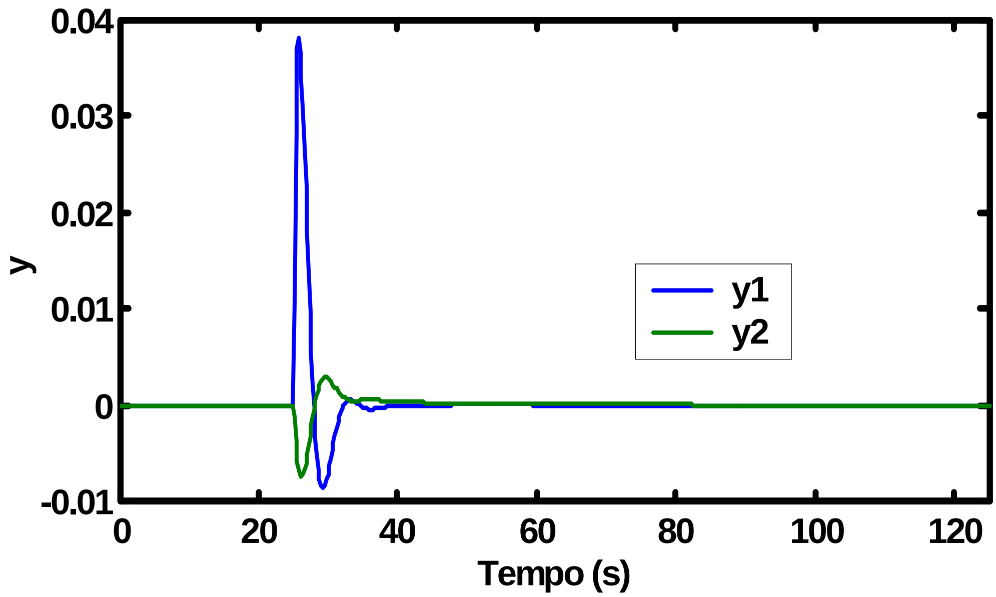
(a)



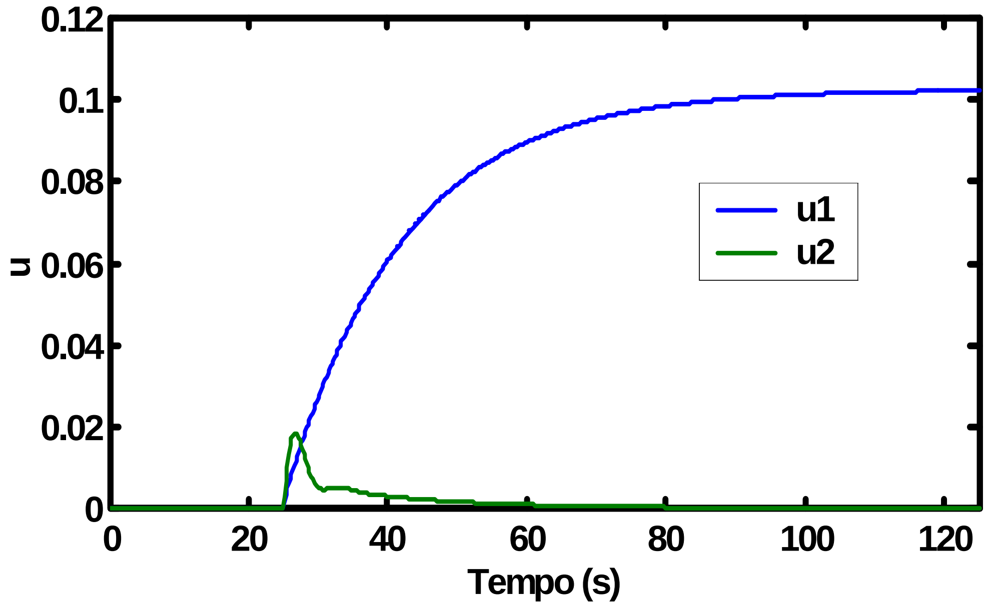
(b)

Figura 5.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

As saídas e sinais de controle apresentados na Figura 5.8 satisfazem ao controle do processo.



(a)



(b)

Figura 5.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

As saídas e o sinal de controle u2 apresentados na Figura 5.9 satisfazem ao controle do processo. O sinal de controle u1 apresentou um esforço excessivo.

5.5 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi o de projetar controladores usando a técnica de controle ótimo usando o modelo do processo em espaço de estados. Foi apresentada a formulação utilizada no projeto de controladores por controle ótimo. Foram projetados inúmeros controladores e destes selecionados o de melhor resultados no universo de estudo, representado pela Tabela D.1, encontrando-se os gráficos referentes aos problemas mais significativo no corpo deste capítulo e os demais estão no ANEXO. Houve significativa melhoria deste controlador em relação ao projetado no capítulo 4, como a maior robustez quando da presença de desvios planta/modelo, maior rapidez em atingir o estado estacionário atendendo às condições do processo e a exigência de um menor número de simulações de forma a se obter um controlador que atenda às condições exigidas. Porém ainda persistem problemas relacionados quanto ao não atendimento das condições devido esforços excessivos do sinal de controle u1 (Y). Espera-se contornar estes problemas usando a técnicas de projeto de controlador por controle baseado em modelos com e sem restrição, apresentados no capítulo 6.

CAPÍTULO 6

6. PROJETO DE CONTROLADOR USANDO TÉCNICAS DE CONTROLE PREDITIVO

6.1 Introdução

O MPC é um controlador ótimo baseado em modelos para selecionar entradas de controle que minimizam uma função objetivo. A função objetivo é definida em termos de variáveis de sistema presentes e preditas e avaliada usando um modelo explícito para prever as saídas futuras do sistema. A idéia central do controle preditivo é o modelo em si. Os modelos podem ser classificados de diversas maneiras, como mostrou HENSON (1997). Como o MPC requer a solução do modelo para predizer as saídas do processo, a forma do modelo selecionado possui grande influência na possibilidade de implementação. Algumas considerações com relação a modelos específicos podem ser feitas:

- A resposta de sistemas lineares obedece ao princípio da superposição. Muitos dos sistemas de engenharia aproximam-se deste comportamento para pequenas perturbações. Para estes sistemas, de maneira geral, a aplicação da teoria de controle linear leva uma operação completamente satisfatória, sendo estes modelos largamente utilizados na aplicação industrial de MPC. Modelos não lineares são convenientes a representação de muitos processos.
- Grande parte dos sistemas modelada em engenharia é representada por equações diferenciais com o tempo como variável independente. Com o advento dos computadores digitais, modelos na forma de equações de diferenças passaram a ter uma grande importância para a resolução dos modelos. Como o MPC é universalmente implementado na forma discreta, a equação de diferenças neste caso é mais adequada. Modelos em equações diferenciais devem ser discretizados para assim obter uma solução computacional.
- Modelos de parâmetros distribuídos são representados por equações diferenciais parciais e controladores baseados em modelos (MPC) também são aplicáveis nestes casos.

- Todos os processos físicos estão sujeitos a perturbação não medidas. Estas perturbações podem afetar o projeto do MPC e sua operação. Nestes casos é conveniente adotar um modelo estocástico.
- Modelos entrada/ saída oferecem representação do processo sem nenhuma referência a variáveis internas do processo. Já a representação em espaço de estados, permite acesso a variáveis internas, além das entradas e saídas.
- Modelos em domínio de freqüência são baseados na transformada de Laplace de sistema lineares contínuos e não são utilizados em controle preditivo baseado em modelos, exceto para problemas lineares sem restrição.
- Modelos fundamentais são aqueles baseados nos princípios de conservação de massa e energia e em contraste com estes existem os modelos baseados em um conjunto de dados de forma arbitrária.

Como o MPC é um método de controle *on-line*, a velocidade computacional do algoritmo utilizado é essencial. Modelos lineares são muito apropriados para o MPC porque podem ser resolvidos rapidamente e o problema de otimização pode ser estudado como programação linear ou quadrática com *software* robustos e confiáveis facilmente encontrados no mercado.

Para resolver o problema de controle preditivo baseado em modelos é necessário resolver o problema de otimização e o modelo do sistema. Estes procedimentos podem ser implementados de forma seqüencial ou simultânea.

Segundo HENSON (1997), a seleção do horizonte de controle, horizonte de predição, intervalo de amostragem, das matrizes de ponderação e métodos de realimentação possuem profunda influência na estabilidade nominal e na robustez do controlador MPC.

- Em sistemas estáveis e de fase mínima a estabilidade não depende do intervalo de amostragem, mas este deve ser pequeno o suficiente para capturar a dinâmica do processo e evitar oscilações na ação do controle. Para sistemas instáveis a robustez depende criticamente do intervalo de amostragem escolhido.
- Grandes horizontes de predição tendem a produzir ações de controle mais agressivas, com maiores ultrapassagens, com resposta mais rápida e com maior sensibilidade às perturbações, embora este efeito possa ser mitigado pela adição de filtro no laço *feedback*. Horizontes menores que um valor crítico produzem sistemas instáveis. Muitos pesquisadores têm proposto critérios de horizontes que garantem a estabilidade do sistema.

- Horizontes de controle relativamente menores que os horizontes de predição tendem a produzir um controle menos agressivo, respostas mais lentas e menos sensíveis a perturbações.
- Matrizes de ponderação para desvios de *setpoint* na faixa de 1-100 e pequenas ponderações controle e incrementos de controle são as mais utilizadas.

A propriedade mais importante a ser verificada é a estabilidade nominal do sistema, isto é, a estabilidade do sistema livre de erros de modelagem e perturbações, que para sistemas lineares sem restrições é obtido por inspeção dos autovalores da malha fechada. Para sistemas não lineares o segundo método de Lyapunov é utilizado para avaliar a estabilidade do sistema. Para implementar o controle em MPC é necessário que a solução seja continuamente possível, o que implica que a solução da matriz de Riccati esteja sempre disponível para uso a cada instante.

6.2 Formulação

6.2.1 Discretização

Uma vez que a aplicação do conceito de MPC é inerente a discretização do sistema em alguma parte do processo, seja antes ou depois da resolução do problema de otimização, optou-se por realizar a discretização do sistema antes da resolução do problema de otimização e utilizar algoritmos que desenvolvem a aplicação de MPC na forma discreta..

Partindo-se da formulação da planta na forma das equações Eq. 2.1 e Eq. 2.2, representativas de um sistema contínuo, linear e invariante no tempo em modelo de espaço de e resolvendo-o através da Eq. 2.15, obtém-se a Eq. 6.1. Considerando a entrada $\mathbf{u}(\upsilon)$ constante no intervalo de tempo onde $t_0 \leq t \leq t_1$ tem-se a Eq. 6.2 e chega-se a Eq. 6.3. Substituindo a Eq. 6.3 em 6.1 obtém-se a Eq. 6.4. Como o vetor das variáveis de entrada, $\mathbf{u}(\upsilon)$, depende apenas da iteração, pode-se representá-lo por $\mathbf{u}(kT_T)$ na condição discreta. Deste modo obtém-se Eq.6.5.

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_o)}\mathbf{x}(t_o) + \int_{t_o}^{t} e^{\mathbf{A}(t-t_o)}\mathbf{B}\mathbf{u}(\upsilon)d\upsilon \qquad (6.1)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(kT_T)\text{, onde } kT_T \leq t \leq (k+1)T_T \qquad (6.2)$$

$$t_0 = kT_T, \quad t = (k+1)T_T, \quad \Delta t = T_T \qquad (6.3)$$

$$\mathbf{x}[(k+1)T_T] = e^{\mathbf{A}T_T}\mathbf{x}(kT_T) + \int_{kT_T}^{(k+1)T_T} e^{\mathbf{A}[(k+1)T_T - \upsilon]}\mathbf{B}\mathbf{u}(\upsilon)d\upsilon \tag{6.4}$$

$$\mathbf{x}[(k+1)T_T] = e^{\mathbf{A}T_T}\mathbf{x}(kT_T) + \left\{\int_{kT_T}^{(k+1)T_T} e^{\mathbf{A}[(k+1)T_T - \upsilon]}\mathbf{B}d\upsilon\right\}\mathbf{u}(kT_T) \tag{6.5}$$

Definindo-se agora uma nova variável na forma da Eq. 6.6 chega-se à Eq. 6.7, onde $\mathbf{\Phi}$ e $\mathbf{\Gamma}$ são definidos nas Eq. 6.8 e 6.9, como mostrou OGATA (1987).

$$\iota = T_T - t \tag{6.6}$$

$$\mathbf{x}[(k+1)T_T] = \mathbf{\Phi}(T_T)\mathbf{x}(kT_T) + \mathbf{\Gamma}(T_T)\mathbf{u}(kT_T) \tag{6.7}$$

$$\mathbf{\Phi} = e^{\mathbf{A}T_T} \tag{6.8}$$

$$\mathbf{\Gamma} = \left\{\int_0^{T_T} e^{\mathbf{A}\iota}d\iota\right\}\mathbf{B} \tag{6.9}$$

6.2.2 MPC Com Restrições

A fim de simplificar a nomenclatura, o tempo discreto será representado apenas por k, subentendendo o termo T_T. Desta forma o sistema discretizado apresenta a forma mostrada nas equações Eq. 6.10 e Eq. 6.11

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{u}(k) \tag{6.10}$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \tag{6.11}$$

As entradas do sistema podem ser de vários tipos, como mostra a figura 6.1 e a Eq. 6.12.

$$\mathbf{u}^T(k) = \left[\mathbf{m}^T(k)\ \ \mathbf{v}^T(k)\ \ \mathbf{w}^T(k)\ \ \mathbf{z}^T(k)\ \ \mathbf{e}^T(k)\right]^T \tag{6.12}$$

Onde $\mathbf{m}^T(k)$ é um vetor de m variáveis manipuladas, ou sinais de controle, $\mathbf{v}(k)$ é um vetor de m_v perturbações medidas e $\mathbf{w}(k)$, $\mathbf{z}(k)$ e $\mathbf{e}(k)$ são vetores de perturbações não medidas de tamanho m, m_z e ny respectivamente.

As matrizes $\mathbf{\Gamma}$e $\mathbf{D}$ são particionadas como mostram as Eq. 6.13 e Eq.6.14.

$$\mathbf{\Gamma} = \left[\mathbf{\Gamma}_m\ \ \mathbf{\Gamma}_v\ \ \mathbf{\Gamma}_w\ \ \mathbf{\Gamma}_z\ \ \mathbf{0}\right] \tag{6.13}$$

$$\mathbf{D} = \left[\mathbf{0}\ \mathbf{D}_v\ \mathbf{0}\ \mathbf{D}_z\ \mathbf{I}\right] \tag{6.14}$$

É importante observar que **e**(k) não afeta os estados, mas apenas as saídas de forma direta.

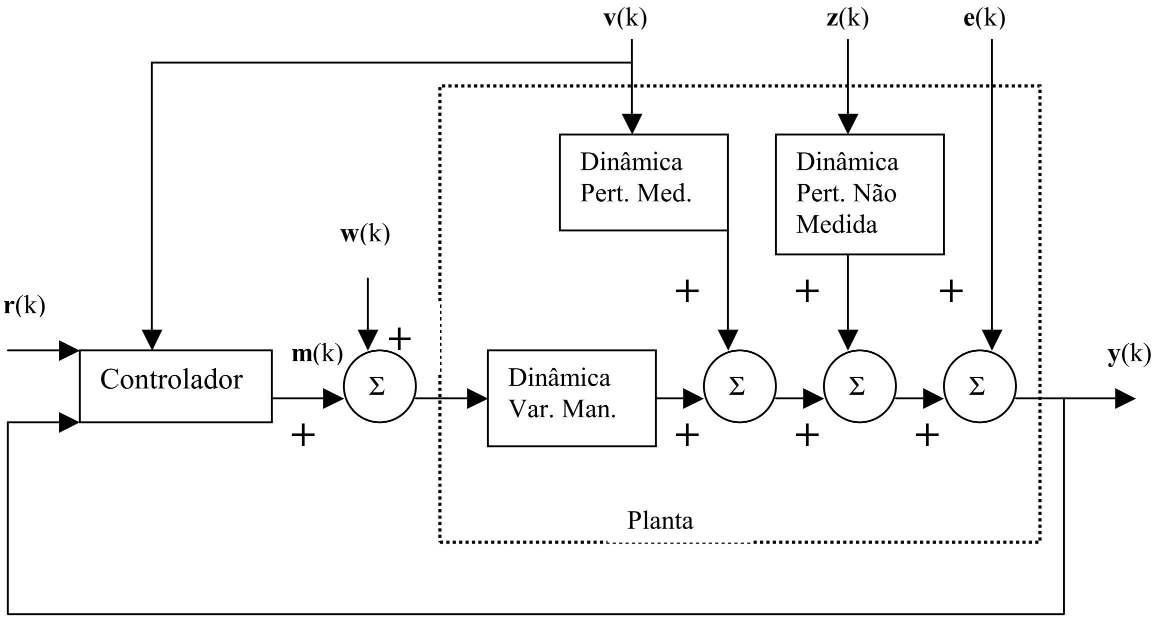


Figura 6.1: Diagrama de blocos da planta e do sistema de controle.

Um modelo interno desenvolve a predição futura das saídas, como uma função que contempla ajustes das variáveis manipuladas e estimativas das perturbações. O controlador escolhe os valores de **u** para enviar para a planta de maneira tal que as saídas preditas da planta sejam otimizadas segundo algum critério. O modelo interno é parte do sistema de controle e todos os estados são conhecidos exatamente diferentemente da planta real. Além disso a estrutura e parâmetros do modelo interno também são conhecidos, como mostram as Eq. 6.15 e Eq. 6.16.

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{\Phi}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{\Gamma}}\tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (6.15)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(k) = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{D}}\tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (6.16)$$

O número de estados é n. O vetor de entradas é definido na equação 6.17.

$$\mathbf{u}^T(k) = \left[\mathbf{m}^T(k)\ \ \mathbf{v}^T(k)\ \ \tilde{\mathbf{w}}^T(k)\ \ \tilde{\mathbf{z}}^T(k)\right]^T \quad (6.17)$$

Onde as variáveis $\tilde{\mathbf{w}}(k)$ e $\tilde{\mathbf{z}}(k)$ são perturbações não medidas de comprimento m e m_z respectivamente e as matrizes $\tilde{\mathbf{\Gamma}}$ e $\tilde{\mathbf{D}}$, como no caso para a planta são particionadas e mostradas nas Eq. 6.18 e Eq. 6.19.

$$\tilde{\mathbf{\Gamma}} = \left[\tilde{\mathbf{\Gamma}}_m\ \ \tilde{\mathbf{\Gamma}}_v\ \ \tilde{\mathbf{\Gamma}}_w\ \ \tilde{\mathbf{\Gamma}}_z\right] \quad (6.18)$$

$$\widetilde{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \widetilde{\mathbf{D}}_v & \mathbf{0} & \widetilde{\mathbf{D}}_z \end{bmatrix} \tag{6.19}$$

Analogamente ao procedimento para LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) assume-se que perturbações futuras não medidas serão zero e usa-se o modelo interno para estimar os estados futuros da planta, como mostram as Eq. 6.20 e Eq. 6.21.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \widetilde{\mathbf{\Phi}}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \widetilde{\mathbf{\Gamma}}_m\mathbf{m}(k) + \widetilde{\mathbf{\Gamma}}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{K}_{MPC}\hat{\mathbf{d}}(k|k) \tag{6.20}$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \widetilde{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \widetilde{\mathbf{D}}_v\mathbf{v}(k) \tag{6.21}$$

Onde $\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)$ são os estados futuros estimados no período de amostragem k+1 baseados na informação disponível no instante k, $\hat{\mathbf{y}}(k|k-1)$ são as saídas da planta estimadas no instante k baseadas na informação do instante k-1, $\mathbf{K}_{MPC}$ é a constante de ganho do estimador e $\hat{\mathbf{d}}$ é o valor de erro corrente do estimador apresentado na Eq.6.22.

$$\hat{\mathbf{d}}(k|k) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) \tag{6.22}$$

O modelo de referência representa a resposta desejada para a planta para uma variação de *setpoint*. Estas equações são mostradas nas Eq. 6.23 e Eq. 6.24.

$$\mathbf{x}_r(k+1) = \mathbf{\Phi}_r\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{\Gamma}_r\mathbf{u}_r(k) \tag{6.23}$$

$$\mathbf{y}_r(k) = \mathbf{C}_r\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{D}_r\mathbf{u}_r(k) \tag{6.24}$$

Onde $\mathbf{x}_r$ é um vetor de n_r estados, $\mathbf{u}$ é um vetor de p sinais de referência e $\mathbf{y}_r$ é a referência de p saídas. A meta do procedimento de projeto do controlador será forçar $\hat{\mathbf{y}}$ para $\mathbf{y}_r$ tão de perto quanto possível, satisfazendo ainda as restrições do processo. As matrizes são um conjunto de parâmetros ajustáveis que podem ser usados para moldar a resposta de sistema de laço fechado, constituído assim numa proposta de robustez. Os coeficientes das matrizes são blocos em diagonal como mostram as Eq. 6.25, 6.26, 6.27 e 6.28.

$$\mathbf{\Phi}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{\Phi}_{rp} \end{bmatrix} \tag{6.25}$$

$$\mathbf{\Gamma}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{\Gamma}_{rp} \end{bmatrix} \tag{6.26}$$

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{C}_{rp} \end{bmatrix} \tag{6.27}$$

$$\mathbf{D}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{r1} & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{D}_{rp} \end{bmatrix} \tag{6.28}$$

Então a resposta de cada p referência de saída depende apenas da correspondente entrada, isto é, as respostas ideais são desacopladas. Para que o sistema possua performance livre de *offset* a matriz de ganho de cada subsistema diagonal deve ser unitária. O uso de subsistemas de primeira ordem simplifica a sintonia *on-line*. Neste caso os elementos das matrizes $\mathbf{\Gamma}_r$ e $\mathbf{\Phi}_r$ são escalares e escolhe-se apenas p parâmetros para especificar o modelo de referência. Os sinais de entrada para o modelo de referência devem ser definidos. No estado estacionário é desejado que $\hat{\mathbf{y}}(\infty) = \mathbf{r}(\infty)$, onde $\mathbf{r}$ é o vetor de p *setpoints*.Como sempre existem erros no modelo interno, não se pode esperar que $\hat{\mathbf{d}}(\infty)=\mathbf{y}(\infty)-\hat{\mathbf{y}}(\infty)$ vá para zero.Como resultado a entrada do modelo de referência é como mostrado na Eq. 6.29.

$$\mathbf{u}_r(k) = \mathbf{r}(k) - \hat{\mathbf{d}}(k\,|\,k) \tag{6.29}$$

Como o modelo de referência possui ganho unitário para cada subsistema diagonal, no estado estacionário e o sistema é capaz de forçar $\hat{\mathbf{y}}$ para $\mathbf{y}_r$, obtém-se a Eq. 6.30.

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{r} - \tilde{\mathbf{y}} + \mathbf{y}_r \tag{6.30}$$

Ou seja, $\mathbf{r} = \tilde{\mathbf{y}}$, que é o resultado desejado.

O problema do controle inicia-se com a definição do período de amostragem (k). É necessário obter a medida das saídas da planta, $\mathbf{y}(k)$, e medir as perturbações, $\mathbf{v}(k)$, e calcular os estado estimado, $\hat{\mathbf{x}}(k\,|\,k-1)$,e estimar os erros, $\hat{\mathbf{d}}(k\,|\,k)$, usando as Eq. 6.20 e Eq. 6.22 para encontrar o melhor valor para as variáveis manipuladas, $\mathbf{m}(k)$. Este sinal será enviado para a planta e mantido constante durante o restante do período de amostragem. Para determinar se uma dada escolha de $\mathbf{m}(k)$ é ótima, deve-se ser capaz de prever os efeitos nas saídas da planta. No MPC isto é feito considerando-se um horizonte finito de períodos de amostragem, M, partindo-se do período k+1. O estimador de estados apresentados nas Eq. 6.20 –6.22 são as bases para a predição. É necessária a relação entre os valores estimados futuros de erros e a perturbação não medida. A aproximação padrão apresentada nas Eq. 6.31 e 6.32 será considerada nesta formulação.

$$\mathbf{v}(k+i\,|\,k) = \mathbf{v}(k)\text{, para i=1, M} \tag{6.31}$$

$$\hat{\mathbf{d}}(k+i\,|\,k) = \hat{\mathbf{d}}(k\,|\,k)\ \text{para i=1, M} \tag{6.32}$$

A equação 6.32 é requerida a fim de eliminar *offset* de estado estacionário. Definindo-se **m**(k+i|k) para ser o valor ótimo da variável manipulada no período k+i, baseado na informação disponível no período k, onde i=0, M-1. Repetindo o uso das Eq. 6.20 e 6.21 e considerando as Eq. 6.31 e 6.32 chega-se à equação de predição apresentada na Eq. 6.33.

$$\boldsymbol{\psi}(k) = \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}(k) + \mathbf{Y}_x \hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{Y}_v \mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d \hat{\mathbf{d}}(k \mid k) \tag{6.33}$$

Onde $\boldsymbol{\psi}(k)$ é um vetor das saídas estimadas, como mostra a equação 6.34

$$\boldsymbol{\psi}(k) = \left[\hat{\mathbf{y}}^T(k+1 \mid k)\ \hat{\mathbf{y}}^T(k+2 \mid k)\ \cdots\ \hat{\mathbf{y}}^T(k+M \mid k)\right]^T \tag{6.34}$$

e $\boldsymbol{\mu}(k)$ é o vetor de valores futuros das variáveis manipuladas, como mostra a Eq. 6.35

$$\boldsymbol{\mu}(k) = \left[\mathbf{m}^T(k \mid k)\ \mathbf{m}^T(k+1 \mid k)\ \cdots\ \mathbf{m}^T(k+M-1 \mid k)\right]^T \tag{6.35}$$

A matriz de resposta pulso **H**, e as matrizes $\mathbf{Y}_x$,$\mathbf{Y}_v$ e $\mathbf{Y}_d$ são constantes e são mostradas nas Eq. 6.36, 6.37, 6.38 e 6.39.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_2 & \mathbf{H}_1 & \mathbf{0} & : \\ : & : & : & \\ \mathbf{H}_{M-1} & \mathbf{H}_{M-2} & & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_M & \mathbf{H}_{M-1} & \cdots & \mathbf{H}_1 \end{bmatrix} \tag{6.36}$$

$$\mathbf{Y}_x = \left[(\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}})^T\ (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^2)^T\ \cdots\ (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^M)^T\right]^T \tag{6.37}$$

$$\mathbf{Y}_v = \left[(\mathbf{H}_{v1})^T\ (\mathbf{H}_{v1} + \mathbf{H}_{v2})^T\ \cdots\ (\sum_{k=1}^{M} \mathbf{H}_{vk})^T\right]^T \tag{6.38}$$

$$\mathbf{Y}_d = \left[(\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{K})^T\ (\tilde{\mathbf{C}}(\tilde{\boldsymbol{\Phi}} + \mathbf{I})\mathbf{K})^T\ \cdots\ (\tilde{\mathbf{C}}(\sum_{k=1}^{M} \tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{k-1})\mathbf{K})^T\right]^T \tag{6.39}$$

As matrizes $\mathbf{H}_i$ e $\mathbf{H}_{vi}$ necessárias para o cálculo das matrizes anteriores são mostradas nas Eq. 6.40 e 6.41.

$$\mathbf{H}_i = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{i-1}\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}_m \text{ para i=1, M} \tag{6.40}$$

$$\mathbf{H}_{iv} = \tilde{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\Phi}}^{i-1}\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}_v + \tilde{\mathbf{D}}_v \text{ para i=1, M} \tag{6.41}$$

A saída do modelo de referência de maneira similar é calculado e mostrado na Eq.6.42, onde $\boldsymbol{\psi}_r$ e $\boldsymbol{\mu}_r$ são mostrados nas equações Eq. 6.43 e 6.44. Estes termos são os valores preditos para as saídas da referência e os valores de entrada para a referência do instante presente e os valores futuros estimados.

$$\boldsymbol{\psi}_r(k) = \mathbf{H}_r \boldsymbol{\mu}_r(k) + \mathbf{Y}_{xr}\mathbf{x}_r(k) \tag{6.42}$$

$$\boldsymbol{\psi}_r(k) = \left[\hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+1 \mid k)\ \hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+2 \mid k)\ \cdots\ \hat{\mathbf{y}}_r{}^T(k+M \mid k)\right]^T \tag{6.43}$$

$$\boldsymbol{\mu}_r(k) = \left[\mathbf{u}_r^T(k)\ \mathbf{u}_r^T(k+1|k)\ \cdots\ \mathbf{u}_r^T(k+M-1|k)\right]^T \quad (6.44)$$

Nas Eq. 6.45, 6.46 e 6.47 são mostradas as matrizes $\mathbf{H}_r$,$\mathbf{H}_{ri}$ e $\mathbf{Y}_{xr}$ respectivamente.

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{r1} & & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \\ \mathbf{H}_{rM} & & \mathbf{H}_{r1} \end{bmatrix} \quad (6.45)$$

$$\mathbf{H}_{ri} = \mathbf{C}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{\,i-1} \boldsymbol{\Gamma}_r + \mathbf{D}_r \text{, para i=1, M} \quad (6.46)$$

$$\mathbf{Y}_{xr} = \left[(\mathbf{C}_r \boldsymbol{\Phi}_r)^T\ (\mathbf{C}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{\,2})^T\ \cdots\ (\mathbf{C}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{\,M})^T\right]^T \quad (6.47)$$

O comportamento desejado para as saídas é representado por $\boldsymbol{\psi}_r(k)$ é dever ser conhecido para definir o problema de otimização. Partindo-se do período de amostragem k, conhece-se $\mathbf{x}_r(k)$ e assumindo um valor futuro para $\mathbf{r}$ de forma que $\boldsymbol{\psi}_r$ possa ser calculado. Os valores futuros para $\hat{\mathbf{d}}$ são dados pela Eq. 6.32. Então $\mathbf{u}_r^T(k) = \hat{\mathbf{u}}_r^T(k+1|k) = ... = \hat{\mathbf{u}}_r^T(k+M-1|k)$, obtendo a matriz $\mathbf{H}_r$ na forma da Eq. 6.48, ou seja o controlador será otimizado para uma variação na forma de degrau sustentado.

$$\mathbf{H}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{r1} \\ \mathbf{H}_{r1} + \mathbf{H}_{r2} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{M} \mathbf{H}_{ri} \end{bmatrix} \quad (6.48)$$

6.2.3 O problema de Otimização

As variáveis manipuladas, $\boldsymbol{\mu}(k)$, são calculadas de forma a minimizar a função objetivo mostrada na Eq. 6.49.

$$J = \min_{\boldsymbol{\mu}(k)} \left\{ [\boldsymbol{\psi}_r(k) - \boldsymbol{\psi}(k)]^T \mathbf{Q}_{MPC} [\boldsymbol{\psi}_r(k) - \boldsymbol{\psi}(k)] + \Delta\boldsymbol{\mu}^T(k) \mathbf{R}_{MPC} \Delta\boldsymbol{\mu}(k) \right\} \quad (6.49)$$

Sujeito as inequações de restrição mostradas nas Eqs. 6.50, 6.51, 6.52, 6.53 e 6.54.

$$\boldsymbol{\mu}(k) \geq \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \quad (6.50)$$

$$\boldsymbol{\mu}(k) \leq \boldsymbol{\mu}_{max}(k) \quad (6.51)$$

$$|\Delta\boldsymbol{\mu}(k)| \leq \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) \quad (6.52)$$

$$\boldsymbol{\psi}(k) \geq \boldsymbol{\psi}_{min}(k) \quad (6.53)$$

$$\boldsymbol{\psi}(k) \leq \boldsymbol{\psi}_{max}(k) \quad (6.54)$$

Onde $\Delta\boldsymbol{\mu}(k)$ é definido na Eq. 6.55.

$$\Delta\boldsymbol{\mu}(k) = \mathbf{R}_\Delta \boldsymbol{\mu}(k) - \boldsymbol{\delta}(k) \quad (6.55)$$

e $\mathbf{R}_\Delta$ e $\boldsymbol{\delta}$ são definidos nas Eqs. 6.56 e 6.57.

$$\mathbf{R}_\Delta = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{I} & \mathbf{I} & & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & & & \cdots & & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & -\mathbf{I} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (6.56)$$

$$\boldsymbol{\delta}(k) = \left[\mathbf{m}^T(k-1) \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0\right]^T \quad (6.57)$$

As matrizes **Q** e **R** são parâmetros de ajuste para o MPC não-negativos. A inequação 6.50 é necessária para a formulação do problema QP, as demais são opcionais.

Resolvendo-se o sistema por métodos da programação quadrática, define-se a variável independente como mostrada na Eq. 6.58 e deve ser positivo para toda solução possível.

$$\boldsymbol{\nu}(k) = \boldsymbol{\mu}(k) - \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \quad (6.58)$$

O problema de otimização apresentado na Eq. 6.49 é rearranjado na forma da Eq. 6.59.

$$J = \max_{\boldsymbol{\nu}(k)} \left\{\mathbf{a}^T(k)\boldsymbol{\nu}(k) - \tfrac{1}{2}\boldsymbol{\nu}(k)^T \mathbf{B}_{MPC}\boldsymbol{\nu}(k)\right\} \quad (6.59)$$

Sujeito às restrições expressa na Eq. 6.60.

$$\mathbf{A}_{MPC}\boldsymbol{\nu}(k) \le \mathbf{b}(k) \quad (6.60)$$

Onde as matrizes $\mathbf{a}(k)$, $\mathbf{B}_{MPC}$, $\mathbf{A}_{MPC}$**,** e $\mathbf{b}(k)$ são mostradas nas Eqs. 6.61, 6.62, 6.63 e 6.64.

$$\mathbf{a}(k) = \mathbf{H}^T\mathbf{Q}_{MPC}\left[\boldsymbol{\psi}_r(k) - \mathbf{Y}_r\mathbf{x}(k\,|\,k-1) - \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) - \mathbf{Y}_d\mathbf{d}(k\,|\,k)\right] + \mathbf{R}_\Delta{}^T\mathbf{R}_{MPC}\boldsymbol{\delta}(k) - \mathbf{B}^T\boldsymbol{\nu}(k) \quad (6.61)$$

$$\mathbf{B}_{MPC} = \mathbf{H}^T\mathbf{Q}_{MPC}\mathbf{H} + \mathbf{R}_\Delta{}^T\mathbf{R}_{MPC}\mathbf{R}_\Delta \quad (6.62)$$

$$\mathbf{A}_{MPC} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{R}_\Delta \\ -\mathbf{R}_\Delta \\ -\mathbf{H} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix} \quad (6.63)$$

$$\mathbf{b}(k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\mu}_{max}(k) - \boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) + \boldsymbol{\delta}(k) - \mathbf{R}_\Delta\boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ \Delta\boldsymbol{\mu}_{max}(k) + \boldsymbol{\delta}(k) + \mathbf{R}_\Delta\boldsymbol{\mu}_{min}(k) \\ -\boldsymbol{\Psi}_{min}(k) + \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}_{min}(k) + \mathbf{Y}_x\hat{\mathbf{x}}(k\,|\,k-1) + \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d\hat{\mathbf{d}}(k\,|\,k) \\ \boldsymbol{\Psi}_{max}(k) - \mathbf{H}\boldsymbol{\mu}_{min}(k) + \mathbf{Y}_x\hat{\mathbf{x}}(k\,|\,k-1) + \mathbf{Y}_v\mathbf{v}(k) + \mathbf{Y}_d\hat{\mathbf{d}}(k\,|\,k) \end{bmatrix} \quad (6.64)$$

O valor ótimo de $\boldsymbol{\nu}(k)$ é solução do conjunto de equações mostrado na Eq. 6.65, como mostrou RICKER (1985) apud RICKER (1990).

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{B}_{MPC} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & -\mathbf{A}_{MPC}{}^{T} \\ \mathbf{A}_{MPC} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}(k) \\ \zeta(k) \\ \lambda_v(k) \\ \lambda_\zeta(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{a}(k) \\ \mathbf{b}(k) \end{bmatrix} \tag{6.65}$$

Onde $\zeta(k)$ são as variáveis de folga com apresenta Eq. 6.66 e λ_v e λ_ζ são os multiplicadores de Lagrange.

$$\zeta(k) = \mathbf{b}(k) - \mathbf{A}_{MPC}\mathbf{v}(k) \tag{6.66}$$

6.2.4 MPC Sem Restrição

Quando não há restrições ativas a solução do sistema após as manipulações é mostrada na Eq. 6.67.

$$\mathbf{m}(k) = \mathbf{K}_x \hat{\mathbf{x}}(k \mid k-1) + \mathbf{K}_{xr}\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{K}_{\mathbf{u}}\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{K}_r\mathbf{r}(k) - \mathbf{K}_y\mathbf{y}(k) + \mathbf{K}_v(k) \tag{6.67}$$

Onde $\mathbf{K}_x$, $\mathbf{K}_{xr}$, $\mathbf{K}_r$, $\mathbf{K}_y$ e $\mathbf{K}_v$ são mostrados nas Eq. 6.68, 6.69, 6.70, 6.71 e 6.72

$$\mathbf{K}_x = \mathbf{L}_{MPC}(\mathbf{H}_r - \widetilde{\mathbf{C}} - \mathbf{Y}_x + \mathbf{Y}_d\widetilde{\mathbf{C}}) \tag{6.68}$$

$$\mathbf{K}_{xr} = \mathbf{L}_{MPC}\mathbf{Y}_{xr} \tag{6.69}$$

$$\mathbf{K}_r = \mathbf{L}_{MPC}\mathbf{H}_r \tag{6.70}$$

$$\mathbf{K}_y = \mathbf{L}_{MPC}(\mathbf{H}_r + \mathbf{Y}_d) \tag{6.71}$$

$$\mathbf{K}_v = -\mathbf{L}_{MPC}\mathbf{Y}_v \tag{6.72}$$

$\mathbf{L}_{MPC}$ são as primeiras m linhas da matriz $\mathbf{B}_{MPC}{}^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{Q}_{MPC}$ e $\mathbf{K}_u$ é a matriz quadrada formada pelas primeiras m colunas de $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{R}_\Delta{}^T\mathbf{R}_{MPC}$.

6.3 Resultados

O Tempo de discretização foi escolhido segundo o critério indicado por SEBORG (1989), na forma da Eq.6.73. Este critério é baseado na resposta em malha aberta do processo, onde t_s é o tempo de assentamento da resposta. A resposta mais rápida do processo em malha aberta possui tempo t_s igual a 7s e sendo assim o tempo de discretização do processo segundo a Eq.6.73 é mostrado na Eq. 6.74. Para as simulações foi utilizado valor de tempo de 1 s para k.

$$\frac{t_s}{15} < T_T < \frac{t_s}{6} \tag{6.73}$$

$$0,466 < T_T < 1,166 \tag{6.74}$$

Foram feitos projetos considerando a aplicação de MPC sem restrições e com restrição. Tabela 6.1 apresenta os valores para as restrições das saída e das entradas considerada na formulação do problema de MPC com restrição.

TABELA 6.1: RESTRIÇÕES DAS ENTRADAS (**u**) E SAÍDAS (**y**) PARA A FORMULAÇÃO DO MPC.

Variável	Valor Máximo	Valor Mínimo	Máxima Variação
δ	0,52	-0,52	-
ΔVT	0,1	-0,1	-
ΔY	0,1	0,1	0,01
ΔVF	4,5	-4,5	0,03

A restrição do ângulo de potência δ foi baseada numa variação máxima de 15 graus para o ângulo de transferência de potência, tanto acima quanto abaixo. Este limite pode ser associado ao problema relativo a vibração excessiva a que ficam expostas as cabeças das bobinas do estator da máquina síncrona em função de uma perturbação transitória do ângulo de potência δ. O valor limitado também pode ser referenciado em ELGERD (1976). A restrição da tensão terminal (VT), refere-se a variação de 10% na tensão terminal, limite prático adotado industrialmente. Uma vez que o modelo foi linearizado na faixa de trabalho nominal, considerou-se que a máquina encontrava-se em 90% de abertura do distribuidor, restando 10% possíveis para serem manobrados. O limite inferior de 80% de abertura para o distribuidor refere-se à faixa de operação com restrições quando já é do conhecimento do projeto de turbinas hidráulicas que o grau de vibração do conjunto girante bem como os problemas ligados à cavitação passam a ser preponderantes nesta faixa de trabalho. A velocidade de abertura do distribuidor foi limitada em 0,01 pu/s devido tratar-se de um sistema físico que possui um tempo de deslocamento com dinâmica própria com limitante motivado pelo projeto do próprio servomotor do distribuidor. A limitação de tensão de campo encontra-se dentro da ~~a~~ faixa de ± 4,5 pu. Este outro limitante está ligado ao grau de isolamento do sistema e sua capacidade dielétrica. A taxa de subida limitada em 0,03 pu/s está ligada às características intrínsecas do processo de amplificação na malha da excitatriz do sistema de excitação.

Baseado nos resultados dos capítulos 4 e 5 percebe-se que as piores respostas ocorrem quando o sistema é submetido a um desvio planta modelo e não há indício de deterioração de resposta apenas pela questão do uso do observador de estado pleno ou mínimo. Sendo assim neste capítulo foi feito apenas o estudo considerando o observador de estado pleno calculado pela teoria de controle ótimo.

O problema de desvio planta/modelo adotado para estudo no MPC foi o caso 1aP dos capítulos 4 e 5 ($K_1 = 0,6$) e um acréscimo de 0,01 pu de perturbação não medida nas variáveis manipuladas (**w**). Para o problema servo adotou-se como nos capítulos anteriores variações de *setpoints* da ordem de 0,01 rad e pu respectivamente para δ e VT. A carga foi considerada no problema regulador como 0,01 pu na perturbação não medida (**z**).

A Tabela 6.2 mostra os parâmetros de ajuste do controlador MPC utilizados na busca de um controlador que atendesse ao processo. Foi feito um ajuste do controlador considerando-se informações encontradas na literatura de forma a obter um controlador que atendesse ao processo, atingindo assim ao objetivo da pesquisa, que trata da possibilidade da aplicação desta teoria de controle a este sistema.

TABELA 6.2: VALORES DOS PARÂMETROS PARA CÁLCULO DO CONTROLADOR MPC.

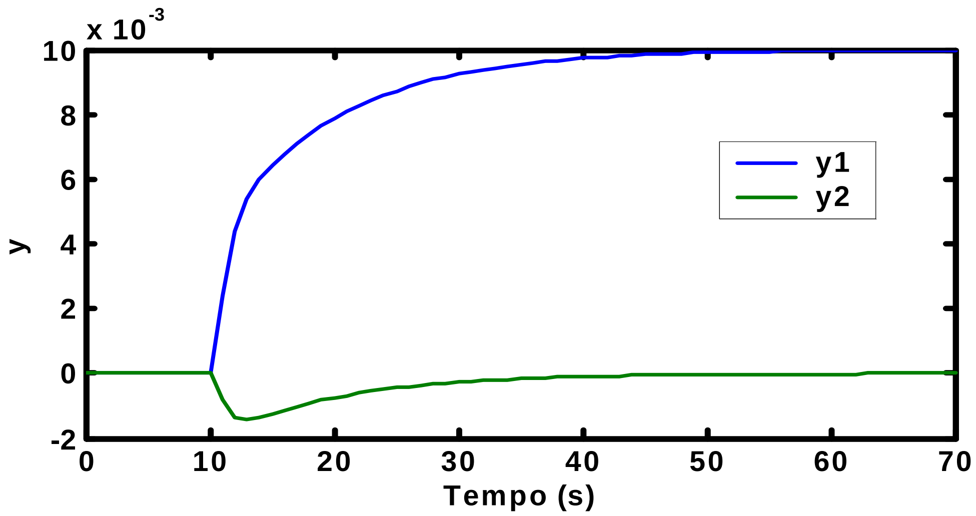
Parâmetro	Valor/unidade
k	,1
v	[]
z	[0,01]
e	[]
w	[0,01 0;0 0,01]
r	[0,01 0]; [0 0,01]; [0,01 0,01]
M	[10]; [5]; [4]; [3]; [1 2 3]; [3 4 5]; ***[5 4 3]***; [10 4 6]; [10 3 2]
N	50, 40, ***20***; 10; 5
$\mathbf{Q}_{MPC}$	$\boldsymbol{I_2}$;I_2*10;[10 0;0 1]; [1 0; 0 10]
$\mathbf{R}_{MPC}$	I_2;I_2*10;[10 0;0 1]; ***[1 0; 0 10]***

As figuras mostradas a seguir são relativas aos resultados de projeto em destaque na Tabela 6.2. De maneira geral todos os ajustes satisfizeram o processo exceto em casos de desvio planta modelo, que exigiram maior pesquisa para ajuste. Os degraus e perturbações foram aplicados no instante t = 10 s.

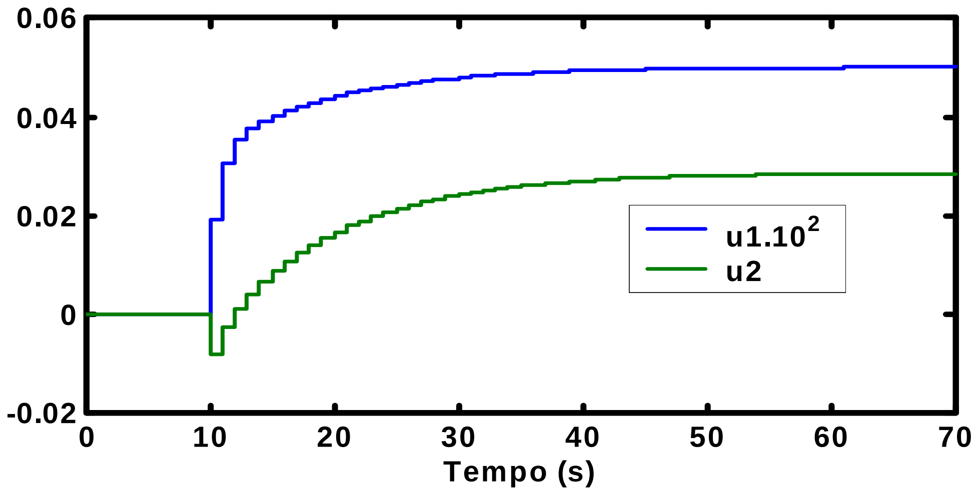
São mostrados a seguir os gráficos para o MPC sem e com restrição - modelagem perfeita e MPC sem e com restrição – desvio planta/modelo para problemas servo e regulador. Nos gráficos de MPC com restrição (u1c,u2c,y1c e y2c) são mostrados também os resultados do MPC sem restrição (u1s, u2s, y1s e y2s).

6.3.1 Problema servo, sem observador de estado e com modelagem perfeita e MPC sem restrições:

As Figuras 6.2 e 6.3 mostram as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema servo, com modelagem perfeita, sem observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



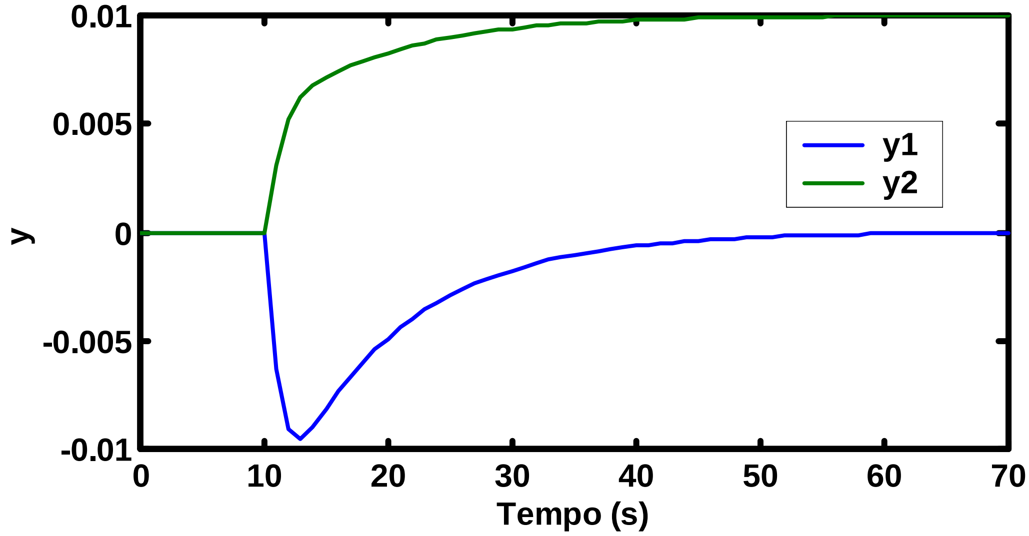
(a)



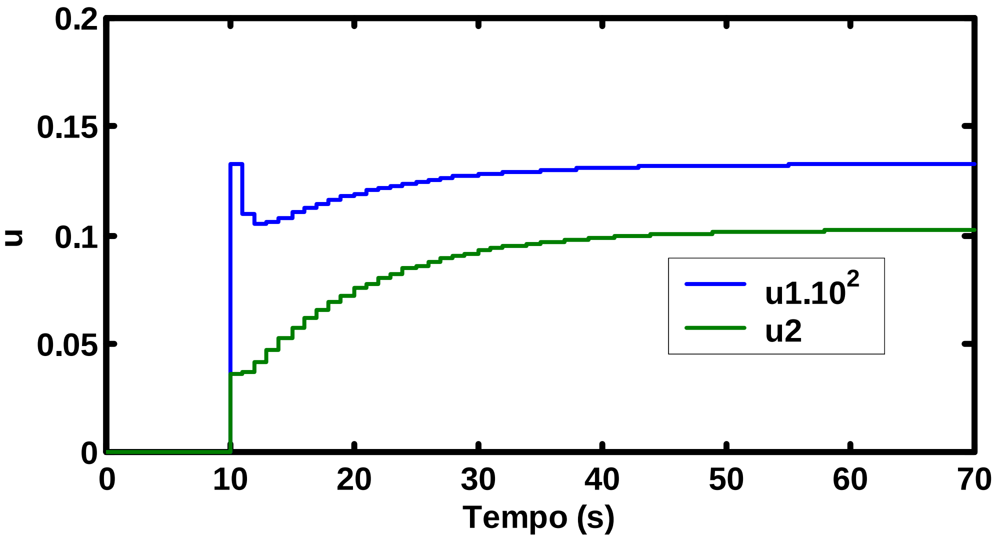
(b)

Figura 6.2 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Pode-se observar na Figura 6.2 que as saídas comportam-se como desejado, ou seja aquela em que houve variação de *setpoint* atinge o valor desejado e a outra saída é ajustada no valor inicial. Os sinais de controle para este caso apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.



(a)



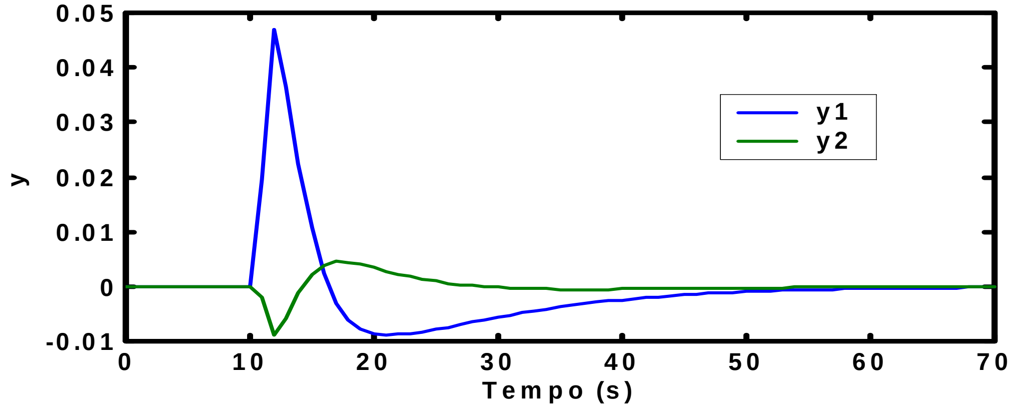
(b)

Figura 6.3 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

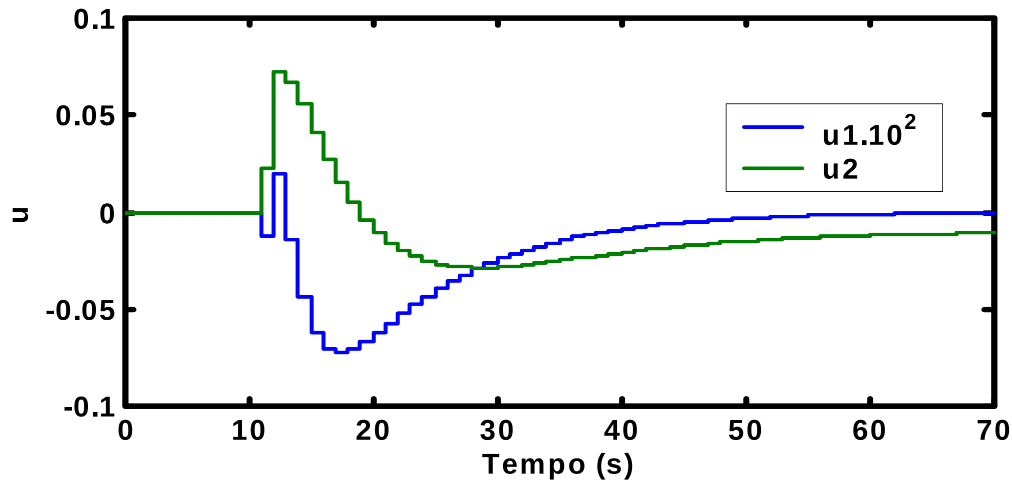
Na Figura 6.3 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

6.3.2 Problema regulador, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC sem restrições:

A Figuras 6.4 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador, com modelagem perfeita, sem observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



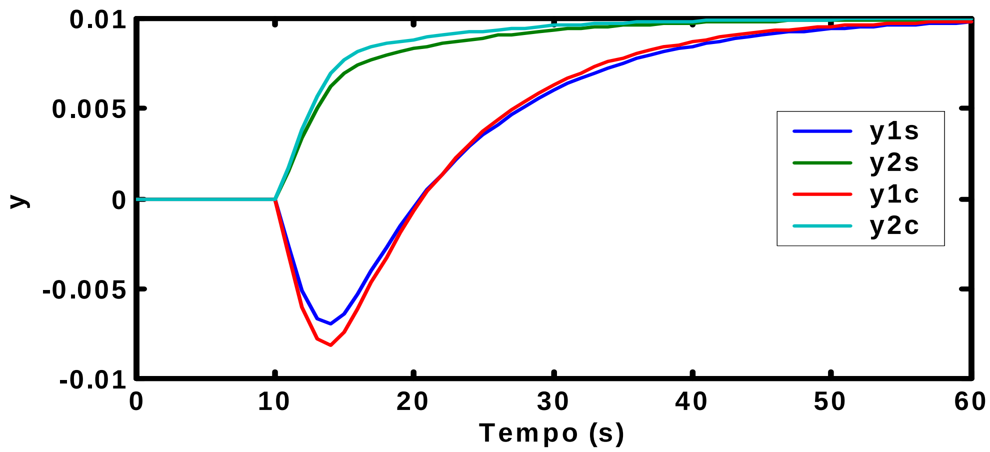
(b)

Figura 6.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Degraus de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle.

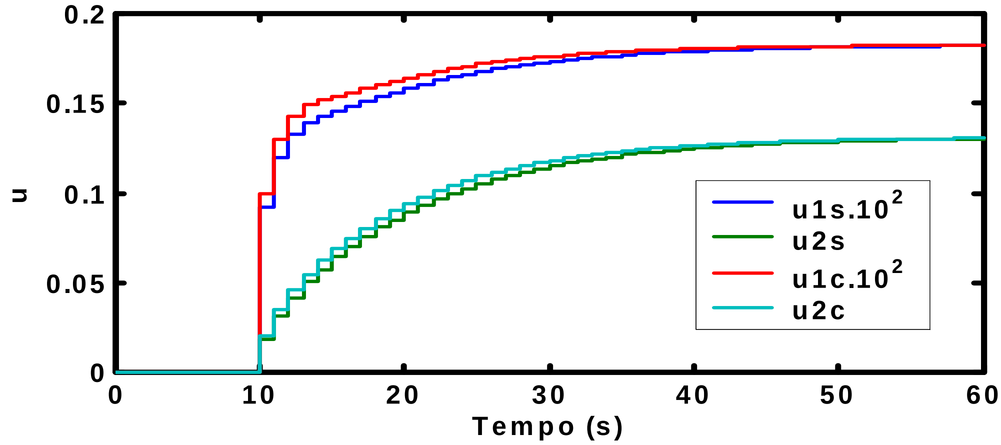
A Figura 6.4 mostra que as saídas do sistema retornaram para o valor inicial, comportamento esperado para um problema regulador e que os sinais de controle apresentam configuração típica para este problema com valores aceitáveis.

6.3.3 Problema servo, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrições:

A Figura 6.5 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema, servo com modelagem perfeita, sem observador de estado e com controladores MPC com e sem restrição.



(a)



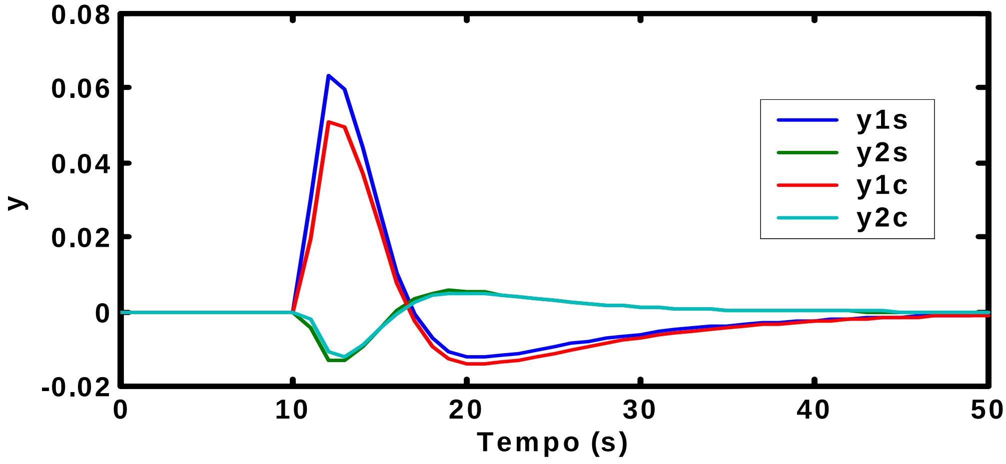
(b)

Figura 6.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

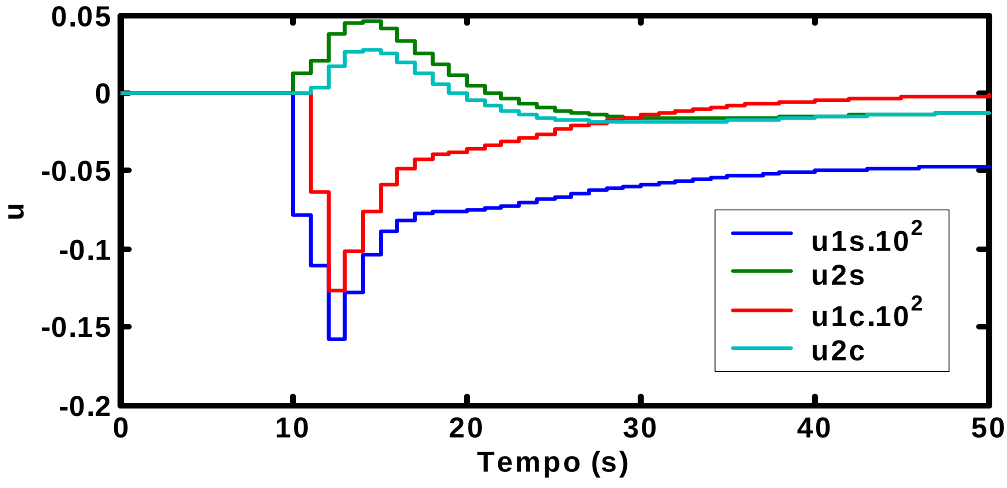
Na Figura 6.5 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

6.3.4 Problema regulador, sem observador de estado, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrições:

A Figura 6.6 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador com modelagem perfeita, sem observador de estado e com controladores MPC com e sem restrição.



(a)



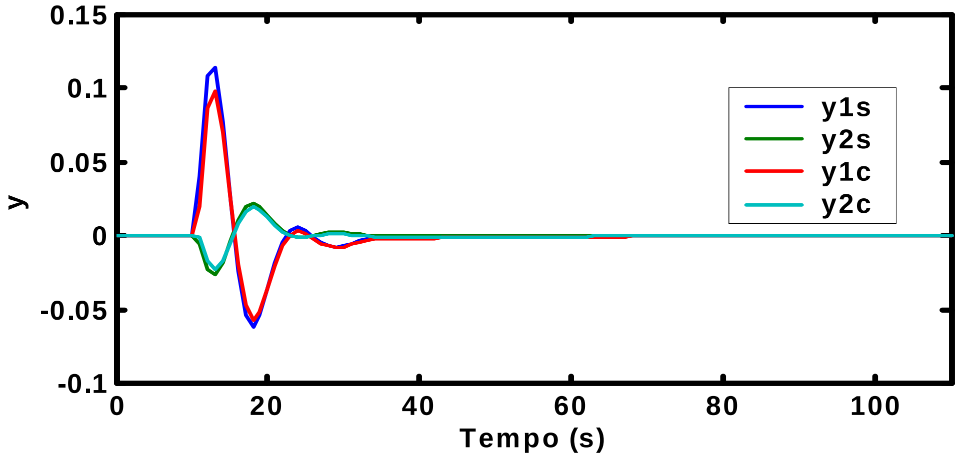
(b)

Figura 6.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle.

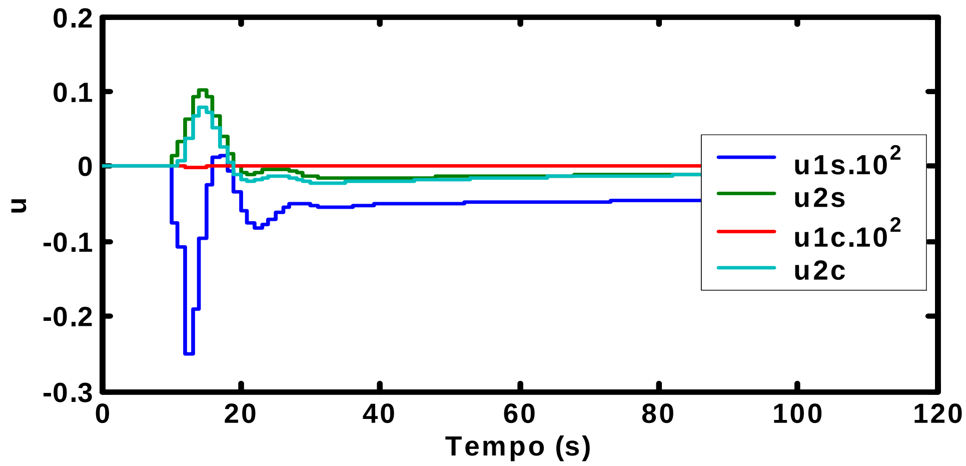
Na Figura 6.6 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

6.3.5 Problema regulador, com observador de estado de ordem plena, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrições:

A Figura 6.7 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador pela entrada de carga, com desvio planta/modelo, com observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



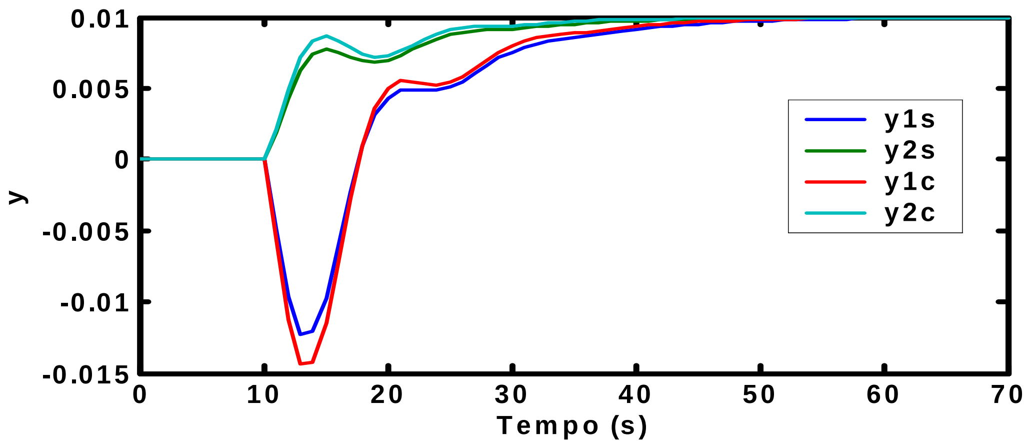
(b)

Figura 6.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle.

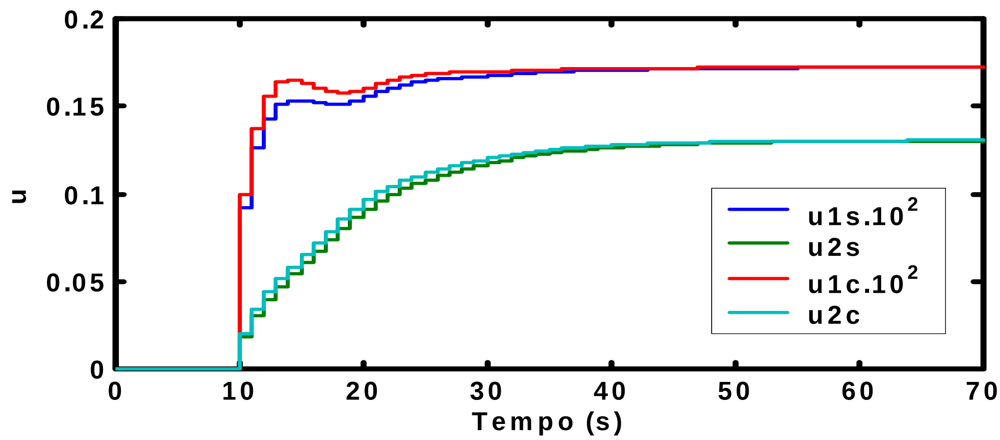
Na Figura 6.7 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

6.3.6 Problema servo, com observador de estado de ordem plena e com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrições:

A Figura 6.8 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador pela entrada de carga, com desvio planta/modelo, com observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



(b)

Figura 6.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura 6.8 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

6.4 Comparação entre os projetos realizados

Uma vez que o projeto dos controladores proposto terminou no tópico anterior, serão apresentadas a seguir algumas figuras comparando as saídas e os sinais de controle do processo submetido aos controladores projetados por colocação de pólos, por teoria de controle ótimo e por controle baseado em modelo (MPC) com e sem restrição. A Figura 6.9 mostra as saídas do sistema submetido aos controladores originais em problema servo na referência do regulador de velocidade (Step – 0,00045 pu), na referência do regulador de tensão (Step1 - 0,01 pu) e em problema regulador pela entrada de carga (Step2 – 0,01 pu).

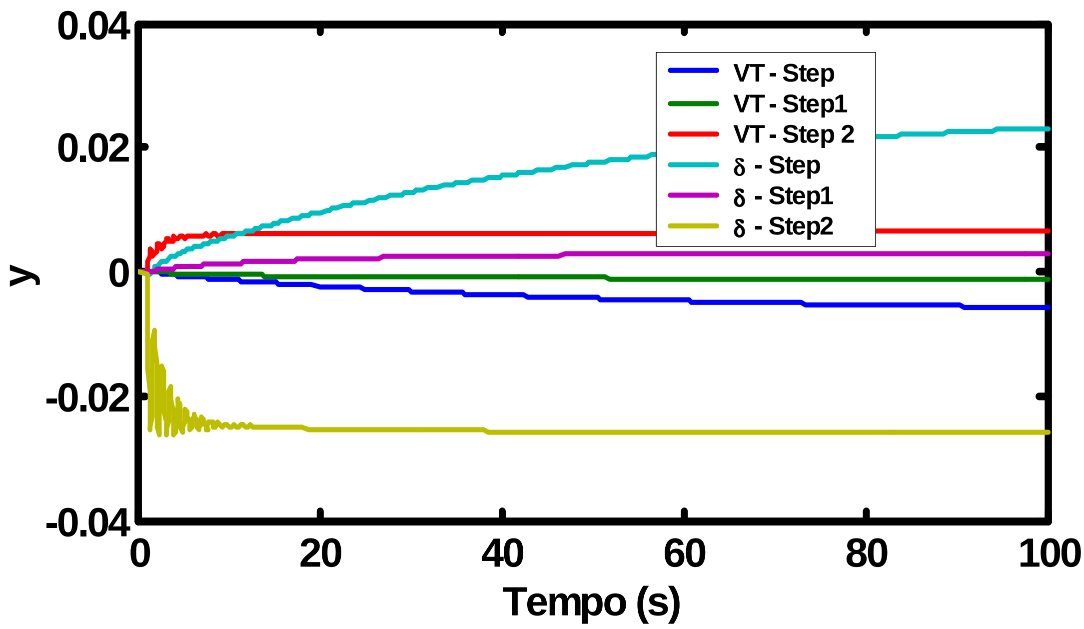


Figura 6.9: Respostas do sistema a degraus nas referências (Step e Step 1) e com carga (Step2), como mostra a Figura 3.5, considerando os reguladores originais.

A Figura 6.9 mostra claramente a presença de *offset* em estado estacionário.

A Figura 6.10 mostra o comportamento do sistema com a nova estrutura proposta sujeito a uma alteração de *setpoint* (S1 e S2) e a entrada de carga (R), considerando a modelagem perfeita, ausência de observador de estado e o controlador por colocação de pólos.

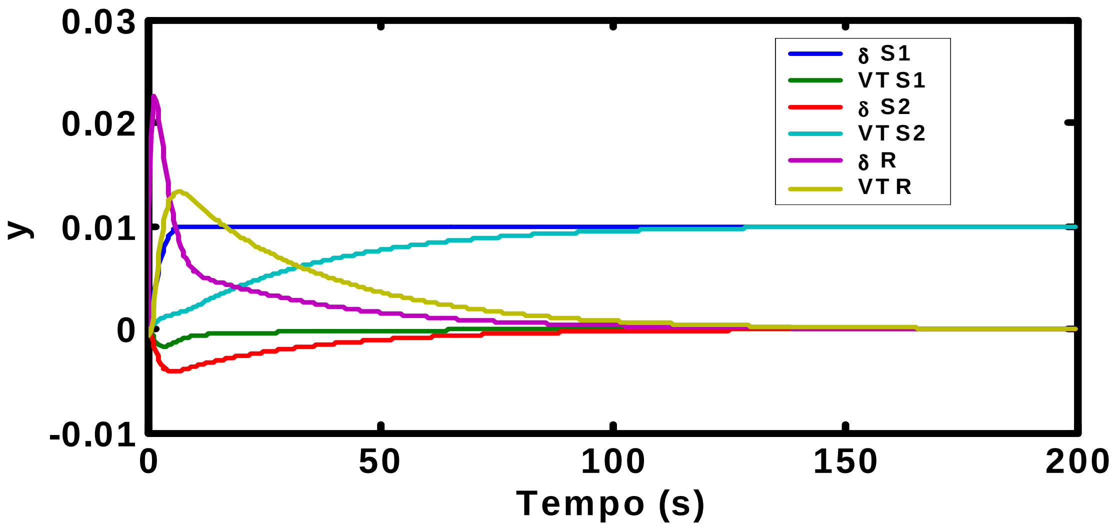


Figura 6.10: Comportamento do sistema com controlador por colocação de pólos. Problemas: servo e entrada de carga.

Na Figura 6.10 pode-se notar que houve a eliminação de *offset* e que o comportamento do sistema tanto para a alteração de *setpoint* quanto para a entrada de carga, comportou-se como desejado. Porém existem problemas com relação a este controlador e que foram abordado no Capítulo 4.

A Figura 6.11 mostra o comportamento do sistema com a nova estrutura proposta sujeita a uma alteração de *setpoint* (S1 e S2) e na entrada de carga (R), considerando a modelagem perfeita, a ausência de observador de estado e o controlador por controle ótimo.

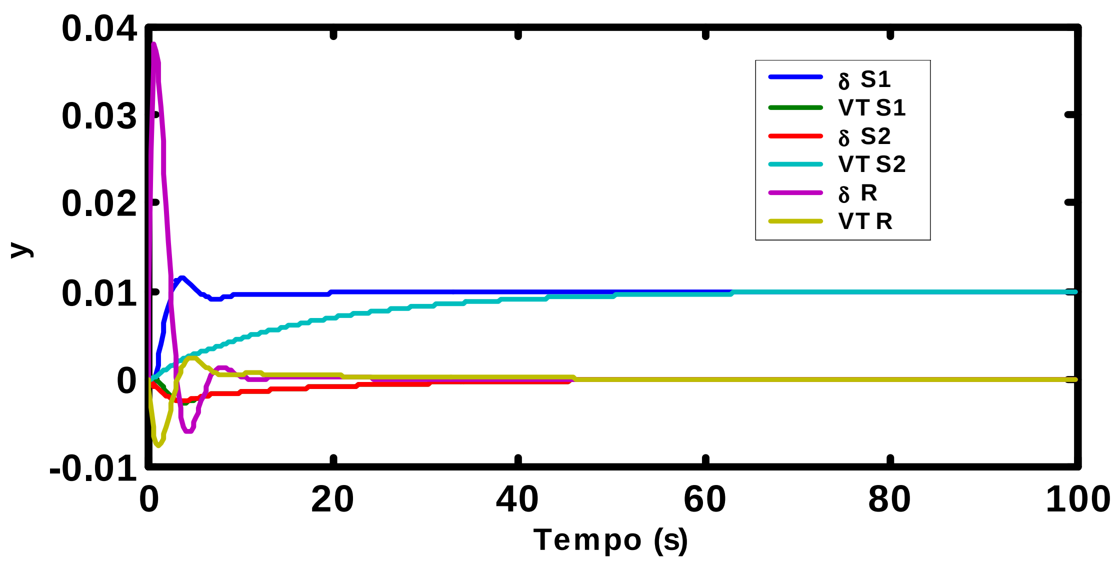


Figura 6.11: Comportamento do sistema com controlador por controle ótimo. Problema servo e entrada de carga.

Na Figura 6.11 pode-se notar que houve a eliminação de *offset* e que o comportamento do sistema tanto para a alteração de *setpoint* quanto para a entrada de carga, comportou-se como desejado. Porém existem problemas com relação a este controlador e que foram abordado no Capítulo 5.

A Figura 6.12 mostra o comportamento do sistema com a nova estrutura proposta sujeita a uma alteração de *setpoint* (S1 e S2) e na entrada de carga (R), considerando a modelagem perfeita, a ausência de observador de estado e o controlador por MPC sem restrição.

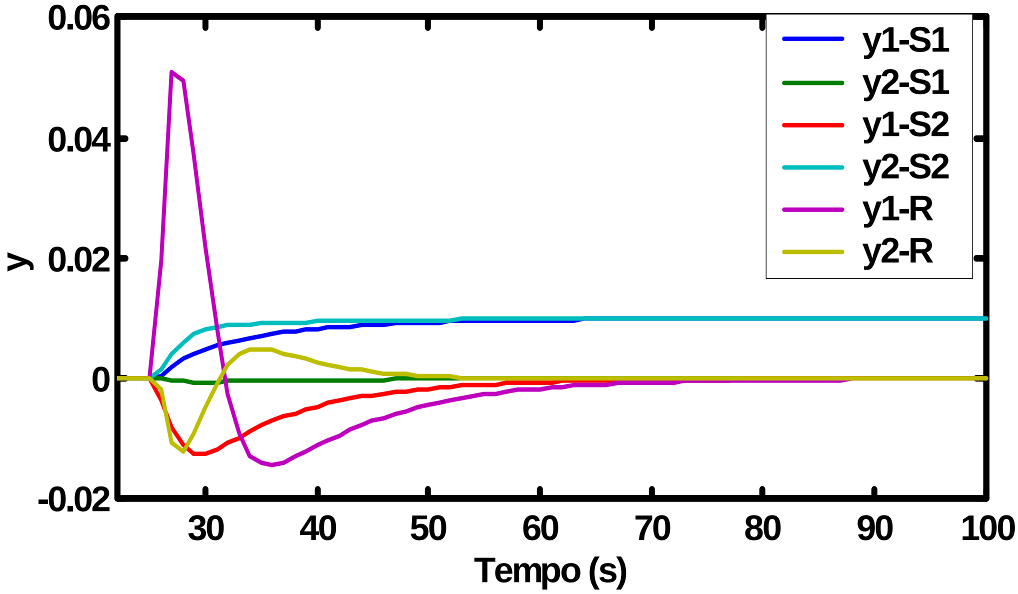


Figura 6.12: Comportamento do sistema com controlador por MPC sem restrição. Problema servo e entrada de carga.

Na Figura 6.12 pode-se notar que houve a eliminação de *offset* e que o comportamento do sistema tanto para a alteração de *setpoint* quanto para a entrada de carga, comportou-se como desejado. Como foi visto neste capítulo este controlador atendeu a todas as condições de operação exigidas.

A Figura 6.13 mostra o comportamento do sistema com a nova estrutura proposta sujeita a uma alteração de *setpoint* (S1 e S2) e na entrada de carga (R), considerando a modelagem perfeita, a ausência de observador de estado e o controlador por MPC com restrição.

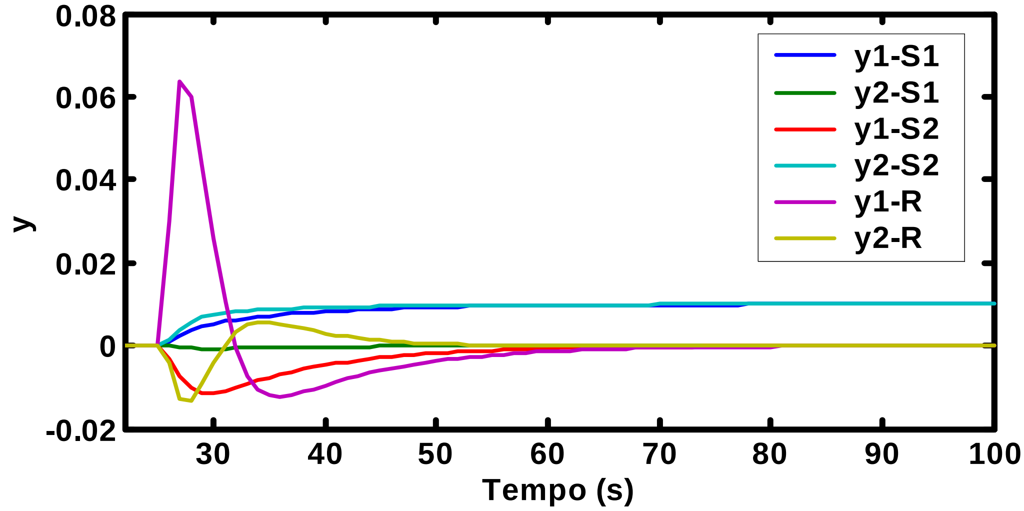


Figura 6.13: Comportamento do sistema com controlador por MPC com restrição. Problema servo e entrada de carga.

Na Figura 6.13 pode-se notar que houve a eliminação de *offset* e que o comportamento do sistema tanto para a alteração de *setpoint* quanto para a entrada de carga, comportou-se como desejado. Como foi visto neste capítulo este controlador atendeu a todas as condições de operação exigidas.

A Figura 6.14 mostra os sinais de controle para os quatro reguladores propostos atuando em uma entrada de carga no sistema, considerando modelagem perfeita e ausência de observadores de estado.

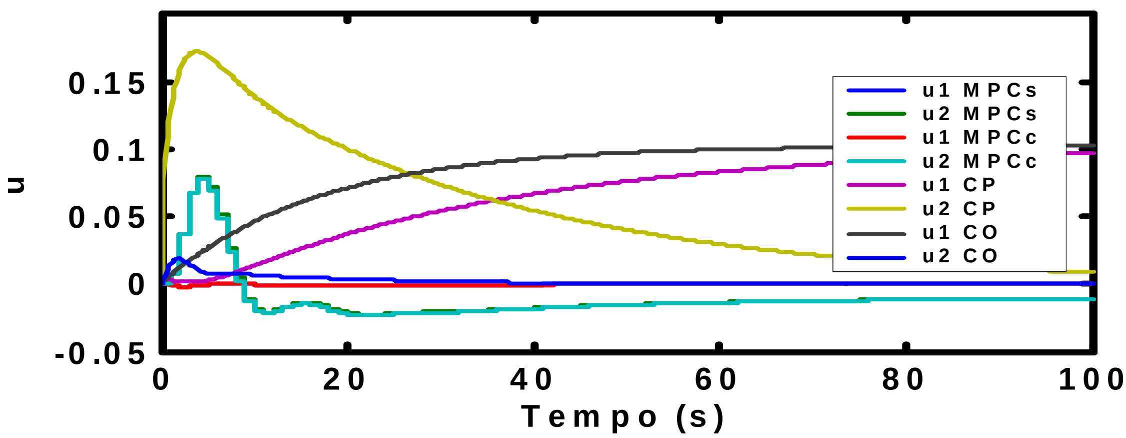


Figura 6.14: Variáveis manipuladas para controle ótimo (CO), MPC (MPCs e MPCc) e colocação de pólos (CP) para entrada de carga no sistema.

Como visto anteriormente o sinal de controle u1 fornecido pelos controladores obtidos por colocação de pólos e por controle ótimo é o maior empecilho para a implantação destas técnicas.

A Figura 6.15 mostra o comportamento das saídas para problema servo com degrau de 0.01 rad em delta com resposta pelos 4 controladores, considerando a modelagem perfeita e a ausência de observadores.

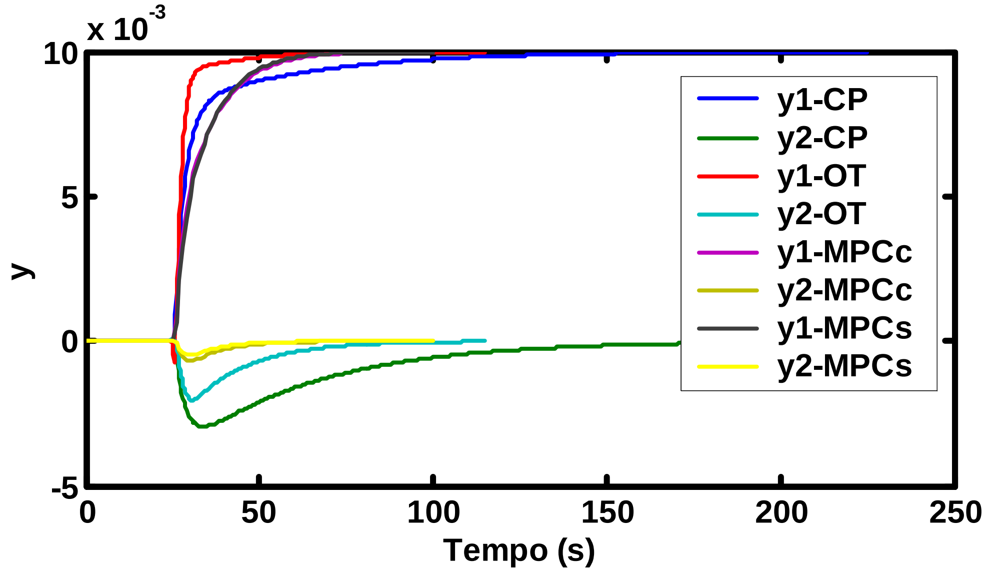


Figura 6.15: Saídas do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade.

As saídas mostradas na Figura 6.15 comportaram se como desejado em todos os casos.

A Figura 6.16 apresenta os sinais de controle para as saídas mostradas na Figura 6.15.

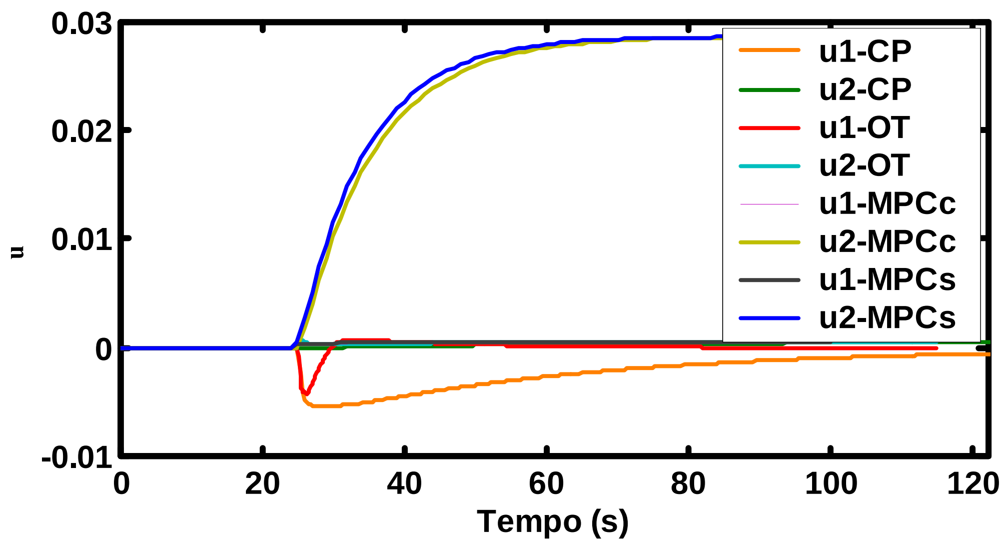


Figura 6.16: Sinais de controle do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade.

O sinal de controle u2 apresenta um valor maior nos controladores MPC do que nos demais levando a crer que estes controladores estão em desvantagem para os demais. Porém se faz necessário relembrar que este sinal possui uma maior faixa de variação, podendo ser de –4,5 pu à +4,5 pu contra a variação de 0 a1 pu do sinal de controle u1. Além do que este ajuste possibilitou que os controladores MPC resolvessem o problema do sinal de controle u1 quando da entrada de carga no sistema, como será visto na Figura 6.18.

A Figura 6.17 mostra as saídas do sistema com os controladores projetados, quando o sistema sofre a entrada de uma carga, considerando modelagem perfeita e a ausência de observadores de estado.

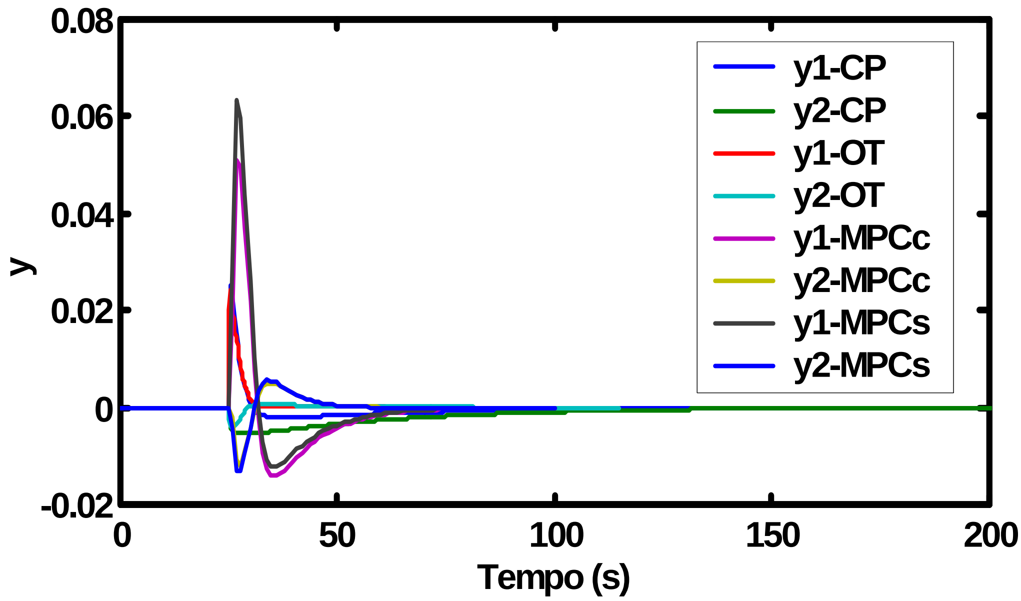


Figura 6.17: Saídas do sistema com os controladores para o problema de entrada de carga ou perturbação não-medida no sistema.

As saídas mostradas na Figura 6.17 comportaram se como desejado em todos os casos.

A Figura 6.18 apresenta os sinais de controle para as saídas mostradas na Figura 6.17.

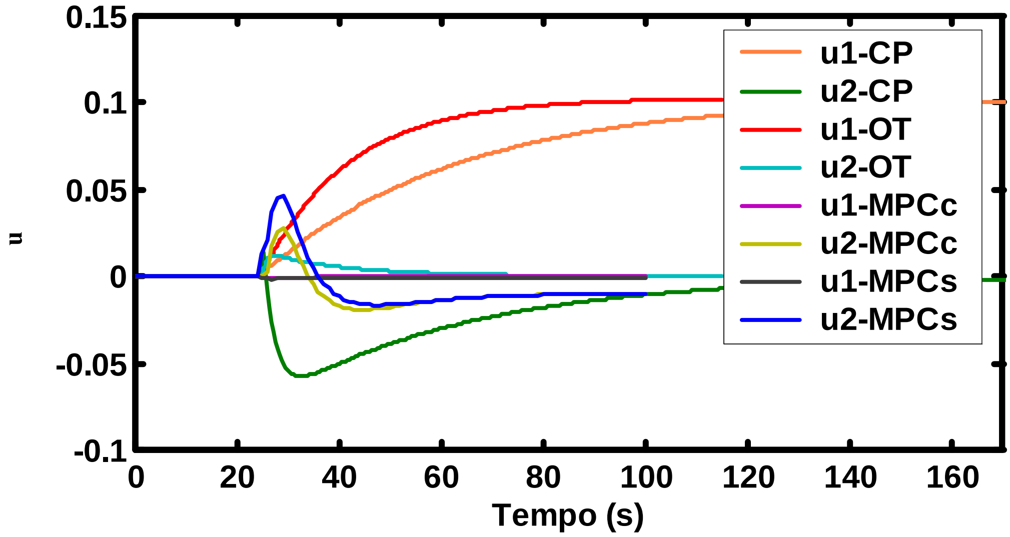


Figura 6.18: Sinais de controle do sistema com os controladores atuando na entrada de carga.

A Figura 6.19 mostra o comportamento das saídas para problema servo com degrau de 0,01 rad em delta com resposta pelos 4 controladores, considerando o desvio planta/modelo e a presença de observadores.

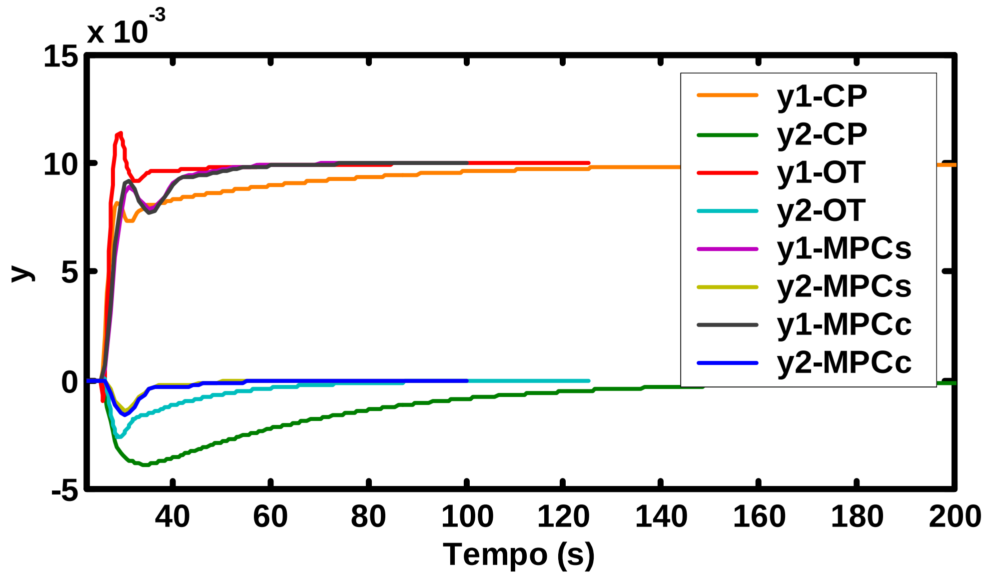


Figura 6.19: Saídas do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade.

O fato de adicionar observadores de estado, tanto de ordem plena quanto de ordem mínima, não indicou deterioração da resposta. A alteração de modelagem, de modelagem perfeita para desvio planta/modelo levou a instabilidade em alguns casos, como já foi visto. Na Figura 6.19 pode-se notar que todos os controladores atenderam à condição de processo.

A Figura 6.20 apresenta os sinais de controle para as saídas mostradas na Figura 6.19.

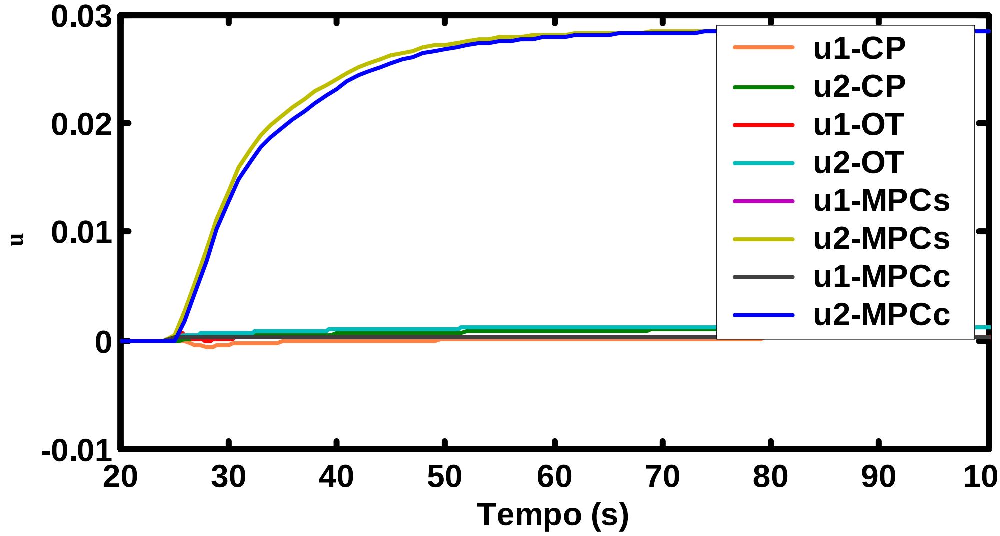


Figura 6.20: Sinais de controle do sistema com os controladores em problema servo no laço de velocidade.

Para a Figura 6.20 vale o mesmo comentário que para a Figura 6.16.

A Figura 6.21 mostra as saídas do sistema com os controladores projetados, quando o sistema sofre a entrada de uma carga, considerando desvio planta/modelo e a presença de observadores de estado de ordem plena.

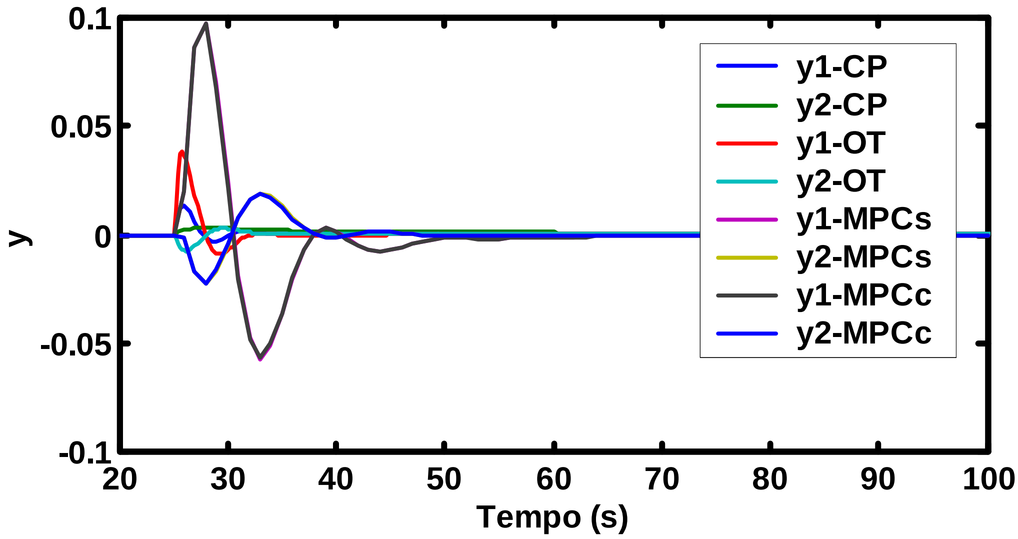


Figura 6.21: Saídas do sistema com os controladores para entrada de carga no sistema.

Na Figura 6.21 percebe-se que todos os controladores atenderam às condições do processo.

A Figura 6.22 apresenta os sinais de controle para as saídas mostradas na Figura 6.21.

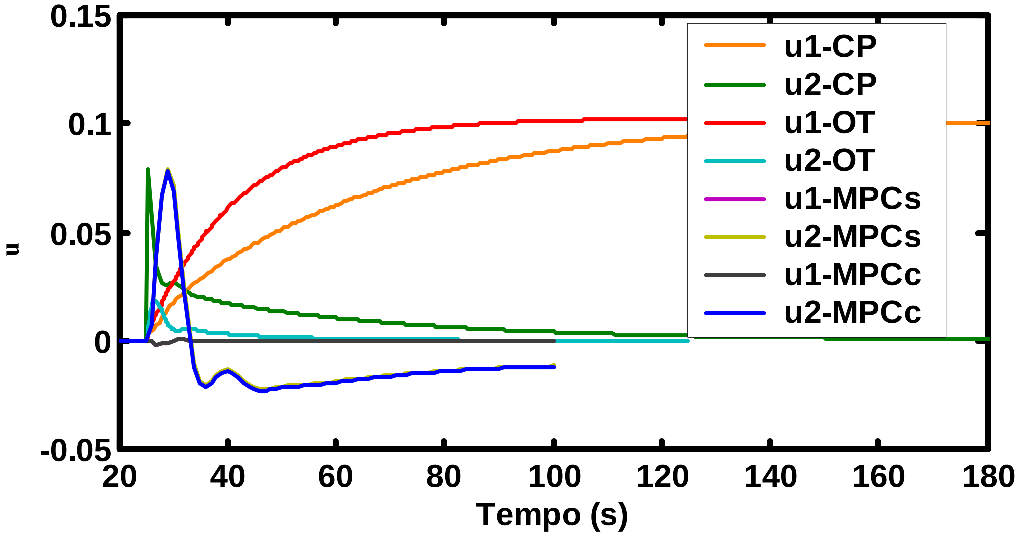


Figura 6.22: Sinais de controle para controladores atuando na entrada de carga no sistema.

Para este caso, também é válido o mesmo comentário que para a Figura 6.16.

6.5 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo apresentar de forma breve a formulação do MPC com e sem restrição e baseado na literatura executar o projeto destes controladores, aplicando-os ao processo de geração de energia elétrica em PCH's. Conforme se pode observar na figuras e comparações apresentadas neste capítulo, os problemas encontrados em capítulos anteriores foram plenamente resolvidos, havendo ainda margem para melhorias. Todos os resultados apresentados satisfazem a operação do processo. Na seção de comparações percebe-se claramente e superioridade do controlador MPC, sob forma com ou sem restrição, em se tratando da análise dos sinais de controle do problema de entrada de carga. Sendo assim considera-se como concluído o trabalho de projeto para esta aplicação, partindo-se para a conclusão, que será apresentada no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÕES

Foi proposta uma alteração física na estrutura da planta a fim de possibilitar a implementação de um sistema de controle conjunto para as duas malhas (MIMO) em um computador ou CLP utilizando o *software* específico de controle desenvolvido neste trabalho. Foi mantido o parâmetro "bp", referente `a queda permanente ou estatismo permanente da regulação de velocidade, para o novo modelo. Foram feitas as seguintes considerações: avaliação das técnicas de controle por colocação de pólos e por controle ótimo, considerando primeiramente a modelagem perfeita e posteriormente o desvio planta/modelo, seguindo a análise com a presença ou não de observadores de estado. Foram estudados os casos clássicos referentes aos problemas regulador e servo.

Baseado nos resultados apresentados no capítulo 3 quando, tanto no modelo original quanto no modelo sugerido, os estudos foram desenvolvidos, pode-se concluir:

- A atuação dos reguladores respeita as condições impostas pelo processo de transmissão de energia primária de origem mecânica para o consumidor na forma de energia elétrica. Este processo tem como característica principal a condição síncrona da freqüência elétrica e condição não-síncrona do ângulo de potência e, por conseguinte, da tensão. Deste modo, operando em rede interligada, não se conseguirá *offset* de velocidade a partir do degrau aplicado na entrada da malha de controle de velocidade o que, não obrigatoriamente, acarretará o mesmo comportamento no sinal de tensão ou do ângulo de potência, considerando-se a malha de controle de tensão.
- Para o modelo original após perturbação ou mesmo alterações de *setpoint* persistem grandes valores de *offset*.
- Existe uma equivalência de comportamento do sistema para a resposta ao degrau no laço de velocidade e no ponto de aplicação de carga.
- Os parâmetros linearizados afetam sensivelmente o comportamento das saídas ao longo da faixa operativa do processo, sendo o parâmetro K_1, p.ex., o de maior influência.

- A dinâmica do sistema submetida a variações nos parâmetros manteve a mesma característica apresentada com os parâmetros originais. As variações de amplitude foram pouco significativas para a maioria dos casos e os tempos de observação variaram entre 30 e 300 segundos mantendo o mesmo perfil. Os casos de maior relevância estão ligados aos parâmetros linearizados.
- A nova abordagem teve como princípio a utilização de um regulador único de controle tanto para a malha de velocidade quanto para a malha de tensão.
- O processo é instável em malha aberta sem nenhum tipo de regulação para um degrau no laço da velocidade.
- O novo sistema proposto é completamente controlável (saída e estado), completamente observável e estável em malha aberta.

Os resultados apresentados referiam-se a melhor condição encontrada dentro do universo de simulações propostas. O problema de desvio planta/modelo foi feito na condição mais severa possível, variando-se o parâmetro K_1, equivalendo à condição de sair do ponto nominal de trabalho para a marcha a vazio.

Foram projetadas várias matrizes de realimentação de estado aplicando a técnica de controle por colocação de pólos visando obter o comportamento do sistema de acordo com um vetor de autovalor desejado nos casos descritos e os resultados foram mostrados no capítulo 4. A busca de um vetor que atendesse às condições do processo foi baseada no estudo da planta com os reguladores atuais. A partir de sua análise pode-se concluir que:

- Variações no estado x_3 produzem o maior impacto na planta em relação aos demais estados. É justamente neste estado que entra o efeito de carga no modelo que pelos gráficos pode confirmar quão agressiva é esta variação para a planta.
- O trabalho de projeto de controladores por colocação de pólos foi feito na forma de tentativa e erro, com região de busca limitada no entorno dos autovalores do processo com a presença dos reguladores atuais, para se obter um comportamento desejado.
- O estudo realizado com a planta e os controladores atuais forneceu um conjunto de autovalores, sobre o qual variações indicaram um conjunto de autovalores que consegue atender a certos problemas avaliados**. Este estudo também contribuiu de forma a melhorar o conhecimento e o domínio sobre o processo.**

- As saídas do modelo para o problema servo e regulador sem observador de estado e com modelagem perfeita apresentaram-se estáveis e como desejado.
- As saídas do modelo para o problema servo e regulador com observador de ordem plena e modelagem perfeita apresentaram-se estáveis e como desejado.
- As saídas do modelo para o problema servo e regulador com observador de ordem reduzida para caso de modelagem perfeita apresentaram-se estáveis e como desejado.
- O esforço da variável manipulada para a entrada de carga L em qualquer problema servo das três situações acima citadas apresentou-se proibitivo para implantação destes controladores projetados.
- O esforço da variável manipulada para a entrada de carga L no problema regulador para observador de estado mínimo, apresentou-se proibitivo para implantação destes controladores projetados.

Com o trabalho incansável e incessante de simulação é possível encontrar um controlador menos agressivo, porém esta não era a proposta deste trabalho. Uma sugestão a fim de direcionar a pesquisa de controle por colocação de pólos é o projeto baseado nos pólos em malha fechada utilizando um controlador por controle ótimo.

- O controlador por colocação de pólos apresentou-se instável para o problema regulador em qualquer caso submetido a desvio planta/modelo, confirmando a falta de robustez, como indica a literatura clássica. O esforço da variável manipulada também se apresentou fora de proporções.
- Na maioria dos resultados não há *offset* no estado estacionário e nem *overshoot*, que possam ser considerados tão indesejáveis quando se trata do controle de processos.

Foram também projetadas várias matrizes de realimentação de estado aplicando a técnica de controle, segundo matrizes de ponderação como indicam GOMES (1987), OGATA (1993) e FRANKLIN e POWELL (1980), e os resultados foram mostrados no capítulo 5. A partir de sua análise pode-se concluir que:

- O projeto com matrizes de ponderação adotadas forneceu saídas estáveis para todos os casos.

- O tempo para se atingir o estado estacionário é bastante reduzido em relação ao processo atual e ao processo com controle por colocação de pólos.
- Na maioria dos resultados não há *offset* no estado estacionário e nem *overshoot*.
- O esforço da variável manipulada apresentou-se desproporcional nos casos servo com entrada de carga L, indicando a necessidade de pesquisa a fim de se obter controladores menos agressivos.
- Pode-se comprovar a robustez do controlador obtido por técnicas de controle ótimo pela obtenção de saídas estável quando o sistema encontra-se sujeito ao desvio planta/modelo.
- O controle por técnicas de controle ótimo mostrou-se mais indicado para implantação que o controle por colocação de pólos.

Foi feito um estudo de técnicas de controle preditivo, como indica a HENSON e SEBORG (1997), aplicado ao sistema e os resultados foram mostrados no capítulo 6. A partir de sua análise pode-se concluir que:

- O projeto do controlador por MPC apresentou-se satisfatório em todos os casos.
- O esforço das variáveis manipuladas mostrou-se compatível e satisfatório para todos os casos.
- A sintonia do MPC exigiu menor número de simulações de forma a encontrar um controlador robusto que atendesse a todas as exigências do processo.
- O simples uso de um controlador MPC sem restrição mostrou melhoria na malha fechada do processo e de grande eficiência na dinâmica do controle do processo.
- O controlador MPC é mais facilmente ajustado como um controlador robusto.
- O impacto de uma entrada de carga no sistema local foi absorvido de maneira perfeita pelo controle MPC.
- Não houve *offset* e nem *overshooting* consideráveis.
- Os resultados demonstram claramente a superioridade deste controlador perante os demais avaliados neste trabalho, indicando que sua implantação certamente oferecerá ao processo uma melhoria técnica e de padrões de qualidade.
- Os valores para horizonte de controle, em 5s, e para o horizonte de predição, em 20 s, foram definidos em função das respostas obtidas para o conjunto controlador-processo.

O tempo de ciclo aproximado para um programa deste porte, considerando-se tanto o passo de integração adotado (passo < 100 ms) quanto um provável tempo de interrupção do programa (valor estimado em cerca de 50 ms), deverá ficar em torno de 150 ms. Este tempo é suficiente para se respeitar a dinâmica do sistema elétrico aqui representado pela PCH dos Martins.

Os valores para o horizonte de controle, em 5 s, e para o horizonte de predição, em 20 s, foram definidos em função das respostas obtidas para o conjunto controlador-processo.

Não se preocupou durante este trabalho em se obter o melhor controle por não ser esta a meta principal, mas sim apresentar a possibilidade de se atingir tal condição.

Logo, pode-se concluir que a alteração proposta é viável e a implantação de controle utilizando técnicas de controle moderno e controle preditivo pode, além de modernizar o processo, levá-lo a um melhor desempenho, contribuindo assim significativamente para o retorno técnico e financeiro.

Proposições Futuras

Com base no que foi desenvolvido dentro dos limites aos quais este trabalho se restringiu pode-se propor temas a serem trabalhados no futuro que permitam a continuidade do mesmo, como são sugeridos a seguir:

- Estudo do sistema buscando a construção da matriz de sensibilidade, que fornecerá a relação entre a localização do autovalor e sua influência para o comportamento dos estados e por conseqüência da saída do sistema.
- Estudo da planta utilizando técnicas de identificação do modelo.
- Estudo utilizando técnicas de identificação e controle não linear.

ANEXOS

ANEXO A – RESOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DE ESTADO

Partido de uma equação diferencial na forma da Eq. A.1, que pode ser representada também pela Eq. A.2. Está é uma equação diferencial linear e 1ª ordem e que pode ser reduzida a uma equação diferencial exata com um fator de integração.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \tag{A.1}$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} - \mathbf{Ax} = \mathbf{Bu} \tag{A.2}$$

Logo o fator de integração $e^{-\mathbf{A}t}$, é aplicado na Eq. A.2 resultando na Eq. A.3 que após rearranjo resulta na forma da Eq. A.4.

$$e^{-\mathbf{A}t}\frac{d\mathbf{x}}{dt} - e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{Ax} = e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{Bu} \tag{A.3}$$

$$\frac{d}{dt}\left(e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{x}\right) = e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{Bu} \tag{A.4}$$

Integrando esta equação, como mostra a Eq. A.5 obtém-se a Eq. A.6, que rearranjada algebricamente resulta na Eq. A.7.

$$\int_{t_0}^{t}\frac{d}{dt}\left(e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{x}\right)dt = \int_{t_0}^{t} e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{Bu}dt \tag{A.5}$$

$$e^{-\mathbf{A}t}\mathbf{x} - e^{-\mathbf{A}t_0}\mathbf{x}_0 = -\frac{1}{\mathbf{A}}\left[e^{-\mathbf{A}t} - e^{-\mathbf{A}t_0}\right]\mathbf{Bu} \tag{A.6}$$

$$e^{-\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{x} - \mathbf{x}_0 = -\frac{1}{\mathbf{A}}\left[e^{-\mathbf{A}(t-t_0)} - \mathbf{I}\right]\mathbf{Bu} \tag{A.7}$$

A solução na forma explícita de **x** é mostrada na Eq. A.8.

$$\mathbf{x} = e^{\mathbf{A}(t-t_0)}\mathbf{x}_0 + \mathbf{A}\left[e^{-\mathbf{A}(t-t_0)} - \mathbf{I}\right]\mathbf{Bu} \tag{A.8}$$

ANEXO B – TABELAS DO CAPÍTULO 3

Nas tabelas são listados os tempos para que o sistema obtenha o estado estacionário para a saída mais lenta em segundos e os valores em regime permanente das saídas (δ e VT). Os resultados são mostrados nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 refere-se a variação de 20% acima e abaixo para os casos: degrau no regulador de velocidade, degrau no regulador de tensão e entrada de carga respectivamente.

TABELA B.1: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,00045 PU EM STEP.

Param.	+20%	Degrau em Step – 0,00045			-20%	Degrau em Step – 0,00045		
		t (s)	δ (rad)	VT (pu)		t (s)	δ (rad)	VT (pu)
bp	0,054	170	0,033	-0,009	0,036	250	0,048	-0,011
bt	0,439	250	0,039	-0,011	0,293	230	0,039	-0,011
Td	4,992	250	0,039	-0,010	3,328	220	0,039	-0,011
T	0,360	200	0,039	-0,011	0,240	260	0,039	-0,011
Tw	0,516	270	0,039	-0,010	0,344	270	0,039	-0,011
2H	7,200	280	0,039	-0,010	4,800	280	0,039	-0,011
D	--	--	--	--	1,600	280	0,039	-0,011
K_1	0,984	250	0,024	-0,007	0,656	230	0,100	-0,030
K_2	1,416	210	0,069	-0,020	0,944	220	0,027	-0,007
K_3	0,360	200	0,07	-0,021	0,240	180	0,026	-0,006
K_4	1,380	240	0,033	-0,007	0,920	200	0,02	-0,005
K_5	-0,120	200	0,026	-0,006	-0,080	240	0,025	-0,005
K_6	0,480	230	0,026	-0,007	0,320	170	0,025	-0,005
K_E	0,240	250	0,027	-0,006	0,160	250	0,026	-0,006
T_E	0,600	280	0,025	-0,005	0,400	250	0,026	-0,006
SE	1,716	250	0,025	-0,006	1,144	200	0,025	-0,005
T'_{do}	3,000	200	0,025	-0,005	2,000	250	0,025	-0,006
K_A	-7,800	230	0,026	-0,006	-5,200	200	0,026	-0,005
K_{AP}	0,305	220	0,025	-0,005	0,203	170	0,026	-0,006
K_{AI}	1,200	200	0,025	-0,005	0,800	250	0,025	-0,005
T_I	18,72	300	0,025	-0,005	12,48	200	0,025	-0,005

TABELA B.2: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,01 PU EM STEP1.

Param.	+20%	Degrau em Step 1 – 0,01			-20%	Degrau em Step 1 – 0,01		
		t (s)	δ (rad)	VT(pu)		t (s)	δ (rad)	VT (pu)
bp	0,054	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,5 \times 10^{-3}$	0,036	100	$4,3 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
bt	0,439	100	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,5 \times 10^{-3}$	0,293	100	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
Td	4,992	100	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$	3,328	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
T	0,360	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,7 \times 10^{-3}$	0,240	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,7 \times 10^{-3}$
Tw	0,516	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$	0,344	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
2H	7,200	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$	4,800	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
D	--	--	--	--	1,600	110	$4,2 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^{-3}$
K_1	0,984	110	$2,6 \times 10^{-3}$	$-1,1 \times 10^{-3}$	0,656	150	12×10^{-3}	$-3,9 \times 10^{-3}$
K_2	1,416	90	9×10^{-3}	-3×10^{-3}	0,944	70	$2,4 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}
K_3	0,360	110	9×10^{-3}	$-3,8 \times 10^{-3}$	0,240	100	$2,4 \times 10^{-3}$	$-0,9 \times 10^{-3}$
K_4	1,380	100	$3,6 \times 10^{-3}$	$-1,2 \times 10^{-3}$	0,920	90	$2,3 \times 10^{-3}$	$-0,9 \times 10^{-3}$
K_5	-0,120	120	$2,9 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$	-0,080	100	$0,8 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}
K_6	0,480	100	$2,9 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$	0,320	90	$2,8 \times 10^{-3}$	$-0,9 \times 10^{-3}$
K_E	0,240	90	$3,8 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$	0,160	90	$3,3 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$
T_E	0,600	150	$2,9 \times 10^{-3}$	$-1,1 \times 10^{-3}$	0,400	150	$2,9 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}
SE	1,716	110	$2,3 \times 10^{-3}$	$-1,8 \times 10^{-3}$	1,144	100	$3,9 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$
T'_{do}	3,000	150	$2,8 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}	2,000	150	$2,9 \times 10^{-3}$	$-1,1 \times 10^{-3}$
K_A	-7,800	100	$3,5 \times 10^{-3}$	$-1,2 \times 10^{-3}$	-5,200	110	$2,25 \times 10^{-3}$	$-0,7 \times 10^{-3}$
K_{AP}	0,305	90	3×10^{-3}	$-1,1 \times 10^{-3}$	0,203	100	$2,7 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}
K_{AI}	1,200	100	$3,4 \times 10^{-3}$	$-1,3 \times 10^{-3}$	0,800	100	$2,4 \times 10^{-3}$	$-0,8 \times 10^{-3}$
T_I	18,72	90	$2,9 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}	12,48	70	$2,9 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}

TABELA B.3: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS COM DEGRAU DE 0,01 PU EM STEP2.

Param.	+20%	Degrau em Step 2 – 0,01			-20%	Degrau em Step 2 – 0,01		
		t (s)	δ (rad)	VT (pu)		t (s)	δ (rad)	VT (pu)
bp	0,054	70	-0,038	0,011	0,036	50	-0,038	0,011
bt	0,439	20	-0,038	0,011	0,293	70	-0,039	0,011
Td	4,992	70	-0,039	0,011	3,328	70	-0,039	0,011
T	0,360	70	-0,039	0,011	0,240	80	-0,039	0,011
Tw	0,516	70	-0,039	0,011	0,344	70	-0,039	0,011
2H	7,200	70	-0,039	0,011	4,800	70	-0,039	0,011
D	--	--	--	--	1,600	70	-0,039	0,011
K_1	0,984	80	-0,023	0,065	0,656	120	-0,011	0,03
K_2	1,416	100	-0,069	0,200	0,944	20	-0,027	0,007
K_3	0,360	100	-0,07	0,021	0,240	40	-0,027	0,006
K_4	1,380	80	-0,033	0,009	0,920	20	-0,022	0,0049
K_5	-0,120	20	-0,026	0,007	-0,080	20	-0,025	0,006
K_6	0,480	20	-0,026	0,070	0,320	25	-0,025	0,005
K_E	0,240	70	-0,026	0,006	0,160	60	-0,025	0,006
T_E	0,600	80	-0,026	0,006	0,400	60	-0,025	0,006
SE	1,716	60	-0,025	0,006	1,144	70	-0,026	0,006

Continua

Continuação

T'_{do}	3,000	70	-0,025	0,006	2,000	70	-0,025	0,005
K_A	-7,800	60	-0,026	0,006	-5,200	60	-0,025	0,006
K_{AP}	0,305	40	-0,025	0,005	0,203	50	-0,025	0,005
K_{AI}	1,200	100	-0,025	0,006	0,800	70	-0,025	0,006
T_I	18,72	70	-0,025	0,006	12,48	50	-0,025	0,006

Para alguns parâmetros, que podem variar em função da carga, foram simulados considerando os valores limites indicados por ANDERSON (1980) e os resultados encontram-se nas Tabela B.4, B.5 e B.6.

TABELA B.4: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES .

Param.	Máx.	Degrau em Step – 0,00045			Mín.	Degrau em Step – 0,00045		
		t (s)	δ (rad)	VT (pu)		t (s)	δ (rad)	VT(pu)
D	---	---	---	---	0	230	0,025	-0,005
K_1	1,2	250	13×10^{-3}	-3×10^{-3}	0,6	250	0,06	-1,015
K_2	1,5	250	0,035	-0,009	0,2	200	13×10^{-3}	-3×10^{-3}
K_4	1,8	270	0,065	-0,02	0,2	250	14×10^{-3}	-2×10^{-3}
K_5	0,09	250	0,024	-0,001	-0,15	220	0,025	-0,007
K_6	0,55	200	0,025	-0,007	0,3	230	0,025	-0,005

TABELA B.5: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES.

Param.	Máx.	Degrau em Step 1 – 0,01			Mín.	Degrau em Step 1 – 0,01		
		t (s)	δ (rad)	VT (pu)		t (s)	δ (rad)	VT (pu)
D	---	---	---	---	0	70	$2,9 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}
K_1	1,2	70	$1,4 \times 10^{-3}$	$-0,7 \times 10^{-3}$	0,6	100	$6,5 \times 10^{-3}$	-2×10^{-3}
K_2	1,5	90	5×10^{-3}	$-1,5 \times 10^{-3}$	0,2	100	$2,5 \times 10^{-3}$	$-4,1 \times 10^{-3}$
K_4	1,8	120	7×10^{-3}	-3×10^{-3}	0,2	70	$1,5 \times 10^{-3}$	$-0,5 \times 10^{-3}$
K_5	0,09	90	$2,7 \times 10^{-3}$	$-0,5 \times 10^{-3}$	-0,15	110	$2,9 \times 10^{-3}$	$-1,2 \times 10^{-3}$
K_6	0,55	70	$2,9 \times 10^{-3}$	-1×10^{-3}	0,3	100	$2,7 \times 10^{-3}$	$-0,9 \times 10^{-3}$

TABELA B.6: AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS EM VALORES LIMITES.

Param.	Máx.	Degrau em Step 2 – 0,01			Mín.	Degrau em Step 2 – 0,01		
		t (s)	δ (rad)	VT (pu)		t (s)	δ (rad)	VT (pu)
D	---	---	---	---	0	30	-0,026	0,007
K_1	1,2	30	-13×10^{-3}	3×10^{-3}	0,6	70	-0,058	0,014
K_2	1,5	70	-0,037	0,009	0,2	40	-0,013	0,003
K_4	1,8	100	-0,068	0,021	0,2	60	-0,013	0,002
K_5	0,09	20	-0,024	0,001	-0,15	50	-0,025	0,008
K_6	0,55	30	-0,026	0,007	0,3	20	-0,026	0,005

ANEXO C – LISTA E GRÁFICOS DO CAPÍTULO 4

C.1 – Lista de Simulações

A Tabela C.1 mostra a listagem das simulações. A primeira coluna (Model.) refere-se a modelagem: perfeita (P=M) ou planta diferente do modelo, que expressa o estudo de desvio planta/modelo (nP), onde n pode ser: 1a se a variação da planta for o limite inferior de K_1, ou seja, K_1 = 0.6 e 1b se a variação da planta for o limite superior de K_1, ou seja K_1= 1.15; 2a se a variação da planta em K_3 com K_3 = 0.15 e 2b se a variação na planta for em K_3, com K_3 = 0.45. A segunda coluna (Observ.) indica a presença ou não de observadores de estado e que tipo, se observador de ordem plena (OP) ou de ordem mínima (OM). A terceira coluna (Prob.) indica que tipo de problema foi estudado, servo (S) ou regulador (R). A quarta coluna (Pólos), mostra o vetor utilizado para determinação das matrizes de ganho, onde **r** é o vetor de pólos para o problema regulador, **rs** é o vetor de pólos para o problema servo, **rop** é o vetor de pólos para o observador de ordem plena e **rom** é o vetor de pólos para o observador de estado de ordem mínima. A coluna cinco (Saídas), mostra se as saídas são estáveis e satisfazem a operação do processo (AT) ou não atendem as condições de operação por apresentar instabilidade em alguma resposta ou variações desproporcionais das saídas (IS), dinâmica muito lenta ou rápida demais (DT) ou excessivo esforço na variável manipulada (ME).

TABELA C.1: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR COLOCAÇÃO DE PÓLOS.

Model.	Observ	Prob.	Vetor de Pólos	Saídas
			Avaliando pólos aleatórios	
P=M	Não	R	**r**=[-1 -1,1 -1,2 -1,21 -1,3 -1,4]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-10 -10 -10,1 -10,2 -10,3 -10,4]	DT
P=M	Não	R	**r**=[-3 -5 -7 -1 -10 -0,1]	DT
P=M	Não	R	**R**=[-1 -2 -3 -4 -5 -6]	ME
			Pólos Baseados no modelo de 7 estados.	
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]**	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -0,3308 -0,3309]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,4629 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
			Avaliação de alterações no pólo 1 para **	
P=M	Não	R	**r**=[-3,7119 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME

Continua

Continuação

P=M	Não	R	**r**=[-1,2373 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-11 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	AT
P=M	Não	R	**r**=[-0,1 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	IS
Avaliação de alterações no pólo 2 para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0834 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0278 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	***r=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]***	***AT***
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,001 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	DT/ME
Avaliação de alterações no pólo 3 para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,039 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,013 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -11 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	AT
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,001 -0,4628 -4,3829 -0,3308]	DT/ME
Avaliação de alterações no pólo 4 para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,6942 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,2314 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -11 -4,3829 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,01 -4,3829 -0,3308]	ME/DT
Avaliação de alterações no pólo 5 para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -6,5735 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -2,19145 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -11 -0,3308]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -0,1 -0,3308]	ME/DT
Avaliação de alterações no pólo 6 para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,4962]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,1654]	ME
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -11]	AT
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,01]	ME/DT
Avaliação de alterações nos pólos 5 e 6 (complexos) para **				
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -0,3308+7,41*i -0,3308-7,41*i]	AT
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -0,3308+17,41*i -0,3308-17,41*i]	AT
P=M	Não	R	**r**=[-2,4746 -0,0556 -0,026 -0,4628 -0,3308+0,0741*i -0,3308-0,0741*i]	ME
Problema Servo – Avaliando localização de pólos adicionais				
P=M	Não	S	***rs=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]***	***AT***
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -10 -10]	AT
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -1 -1]	DT/IS
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -0,1 -0,1]	IS
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -0,01 -0,01]	IS
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -0,001 -0,001]	IS
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -1]	IS/ME
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -10 -1]	ME
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -1 -100]	ME
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -1+1*i -1-1*i]	IS/ME

Continua

Continuação

P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100+100*i -100-100*i]	AT
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -10+100*i -10-100*i]	AT
P=M	Não	S	**rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100+10*i -100-10*i]	AT
			Problema Desvio Planta/Modelo	
1aP	Não	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -0,3308-7,41*i] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]	IS
1bP	Não	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]	IS
2aP	Não	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]	IS
2bP	Não	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]	IS
			Observador de Ordem Plena	
P=M	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]; **rop**=**r***8	ME
P=M	OP	R/S	***r=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308]*** ***rs=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100]*** ***rop=r*100***	***ME***
P=M	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100] **rop**=**r***4	IS/ME
1aP	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100] **rop**=**r***100	IS
1bP	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100] **rop**=**r***100	IS
2aP	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100] **rop**=**r***100	IS
2bP	OP	R/S	**r**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308] **rs**=[-2,4746 -11 -0,026 -0,4628 -4,3829 -0,3308 -100 -100] **rop**=**r***100	IS
			Observador de Ordem Mínima	
P=M	OM	R/S	**r**=[-2,4746 -0,026 -4,3829 -0,4628 -11 -0,3328] **rs**=[-2,4746 -0,026 -4,3829 -0,4628 -11 -0,3328 -100 -100] **rom**=[-11 -0,3328]*4	ME
P=M	OM	R/S	**r**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328] **rs**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100] **rom=**[-11 -0,3328]*8	ME

Continua

Continuação

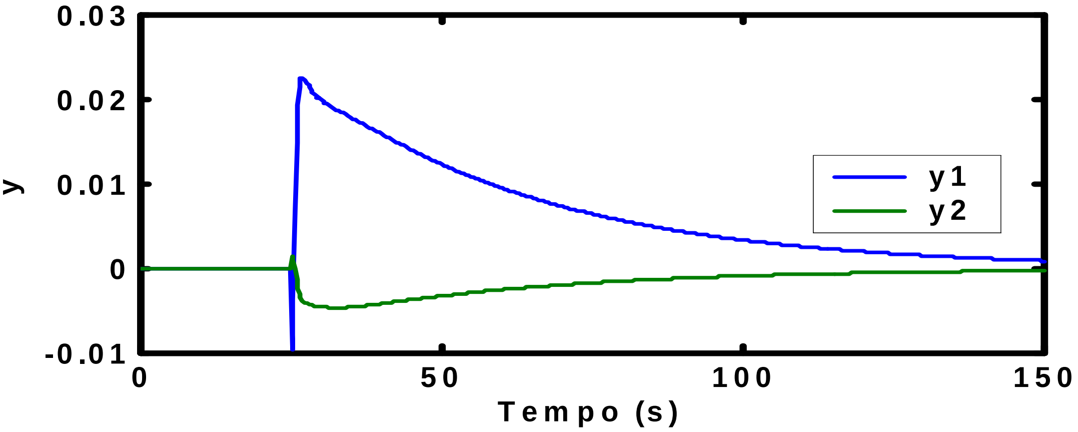
P=M	OM	R/S	***r=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328]*** ***rs=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100]*** ***rom=[-11 -0,3328]*100***	ME
1aP	OM	R/S	**r**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328] **rs**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100] **rom**=[-11 -0,3328]*100	IS
1bP	OP	R/S	**r**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328] **rs**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100] **rom**=[-11 -0,3328]*100	IS
2aP	OM	R/S	**r**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328] **rs**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100] **rom**=[-11 -0,3328]*100	IS
2bP	OM	R/S	**r**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328] **rs**=[-2,4746 –0,026 –4,3829 –0,4628 –11 –0,3328 –100 -100] **rom**=[-11 -0,3328]*100	IS

A justificativa para simular os pólos 5 e 6 se deve ao fato que eles são relacionados diretamente com o laço do regulador de tensão. Estudos demonstram que a malha de regulação de velocidade possui apenas pólos reais e a componente complexa está ligada essencialmente à malha de regulação de tensão. Os gráficos mostrados a seguir são referentes aos controladores cujos autovalores encontram-se grifados na Tabela C.1 e apresentados na Tabela 4.2. As perturbações, degraus de *setpoint* e entradas de carga foram feitas no instante t=26 s.

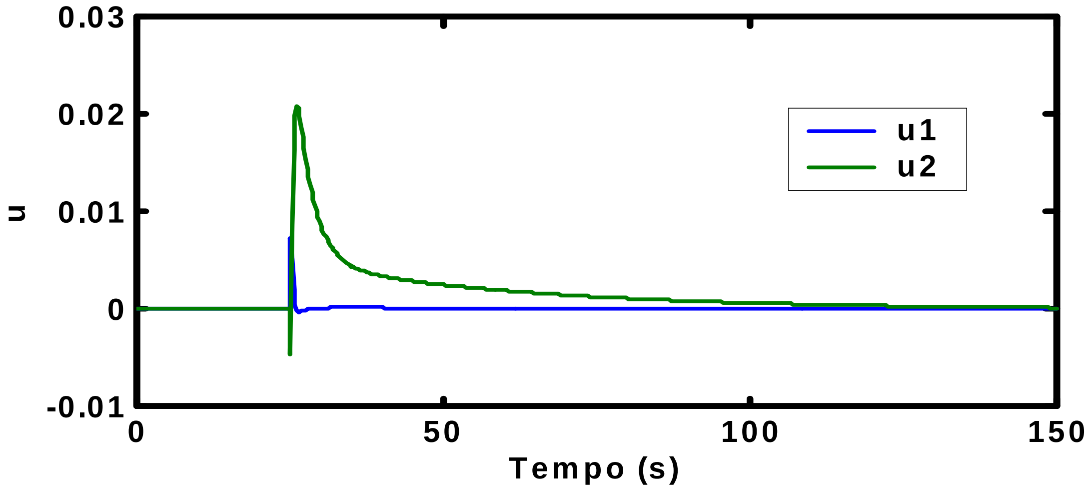
C.2 Gráficos

C.2.1 Problema regulador,com observador pleno e com modelagem perfeita:

A Figura C.1 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente .



(a)



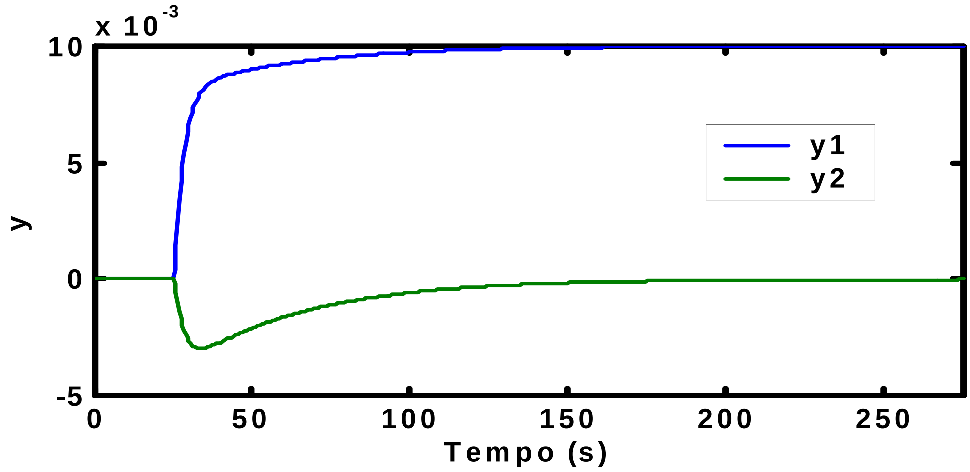
(b)

Figura C.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos.

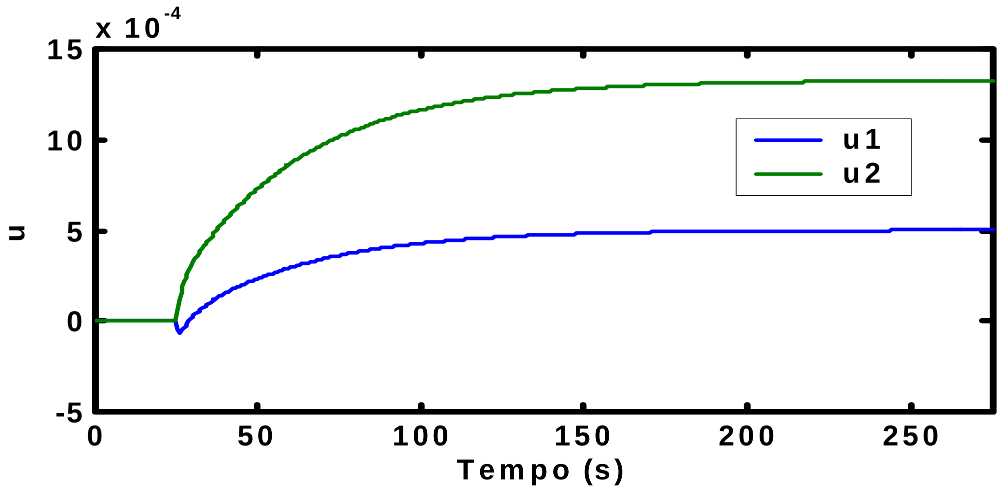
As saídas e os sinais de controle apresentados na Figura C.12 satisfazem ao controle do processo.

C.2.2 Problema servo,com observador pleno e com modelagem perfeita:

A Figura C.2 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para controlador atuando em problema servo, com observador de estado de ordem plena e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 na referência do laço de velocidade. As Figuras C.3 e C.4 mostram os resultados para degrau de 0,01 na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente. Este caso foi escolhido por apresentar o resultados críticos e limitantes ao longo da pesquisa.



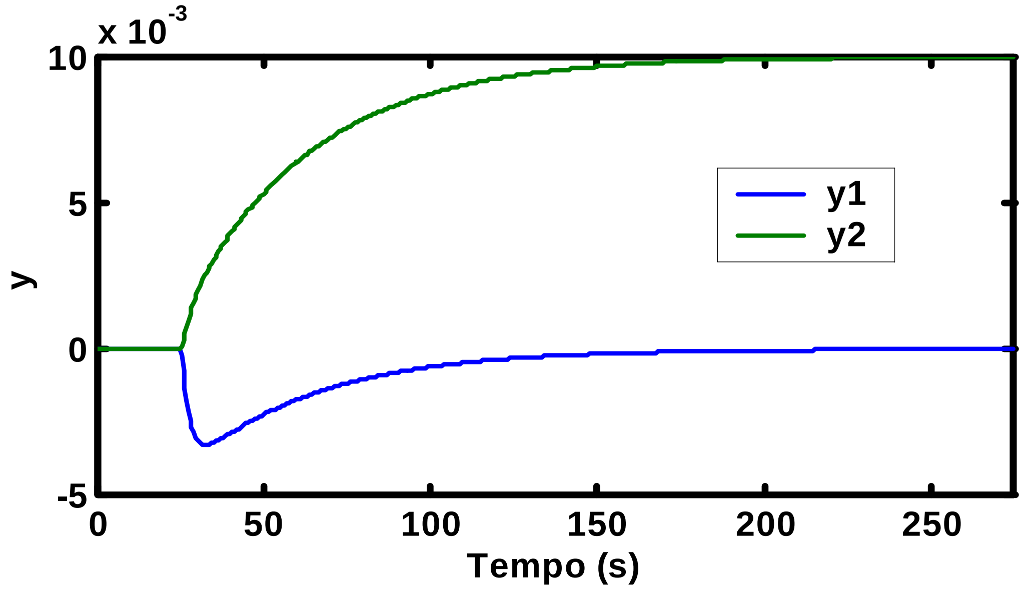
(a)



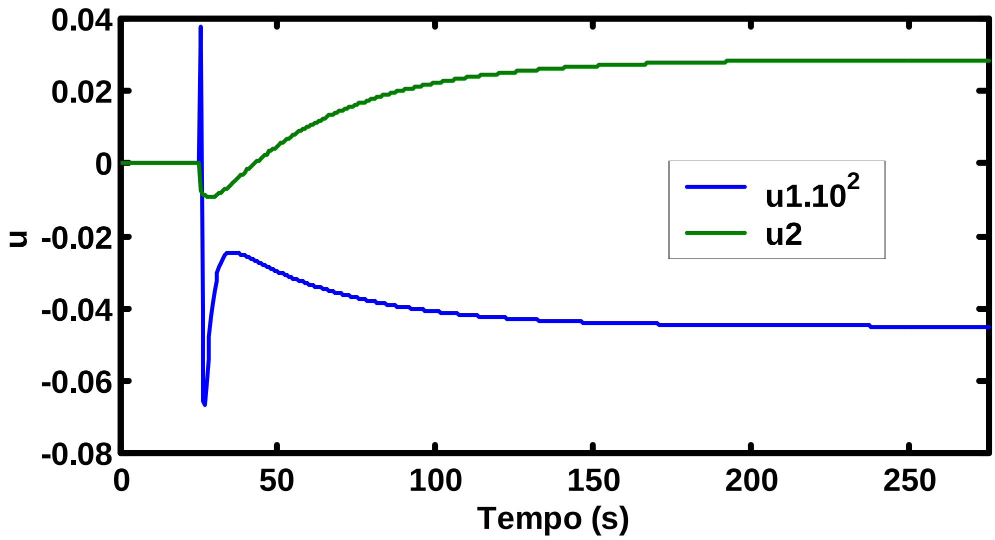
(b)

Figura C.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

As saídas e sinais de controle apresentados na Figura C.2 satisfazem ao controle do processo.



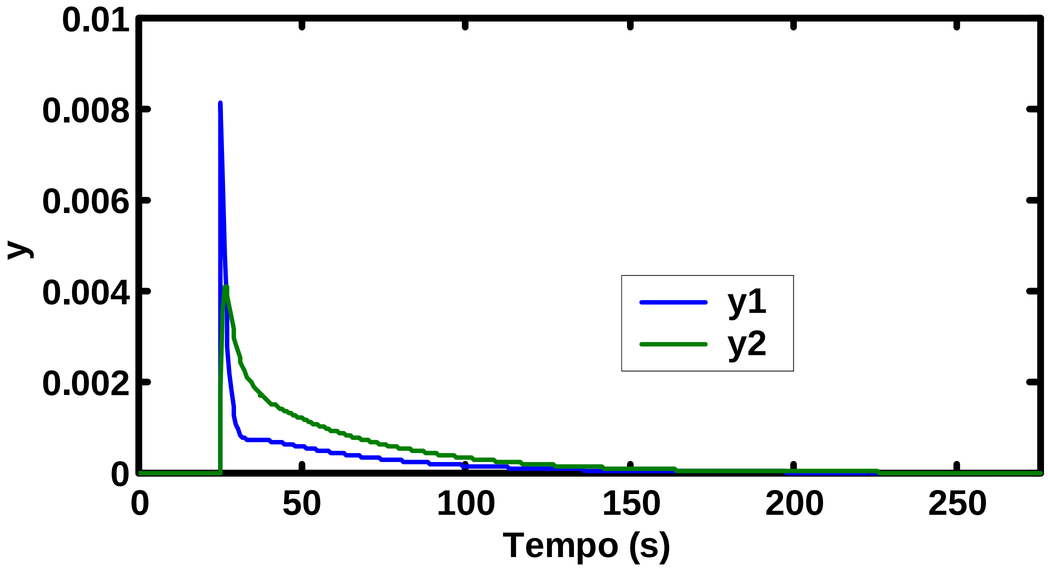
(a)



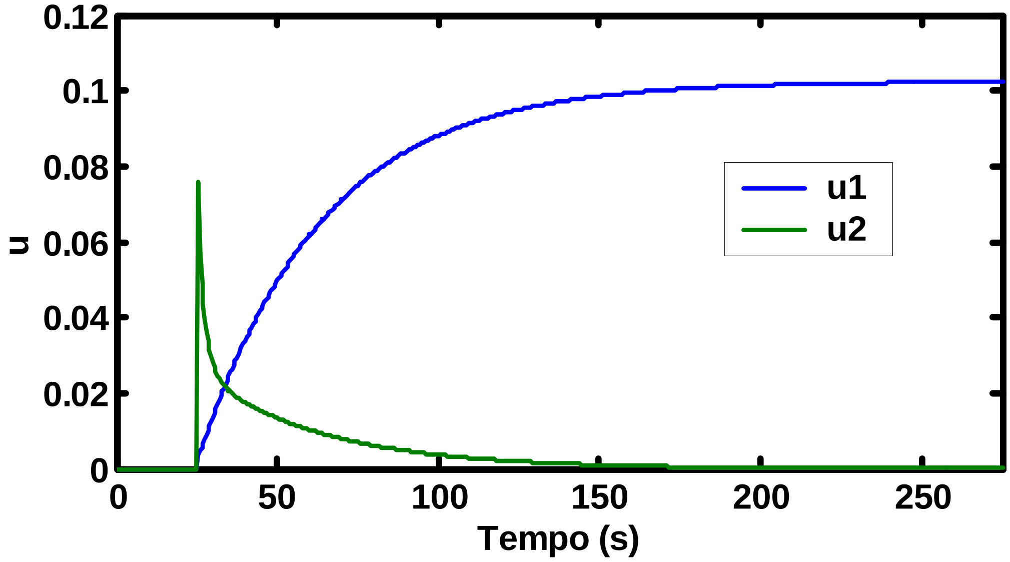
(b)

Figura C.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

As saídas e sinais de controle apresentados na Figura C.3 satisfazem ao controle do processo.



(a)



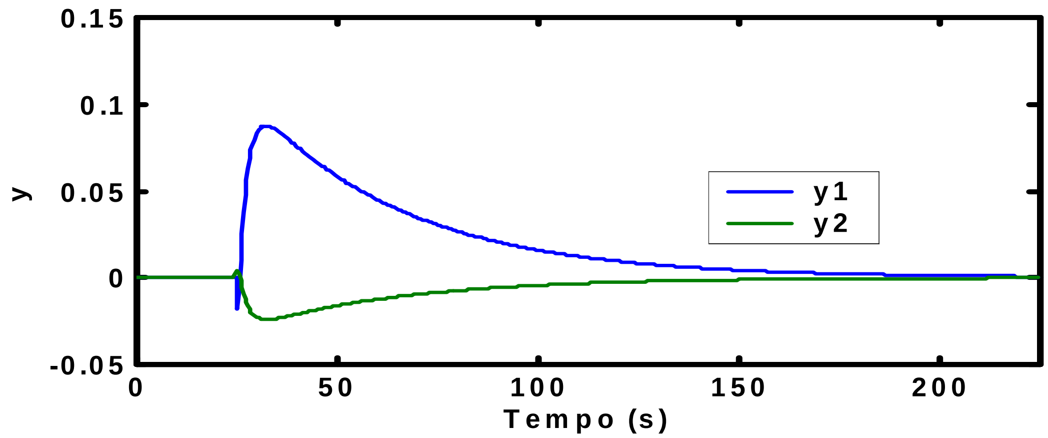
(b)

Figura C.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0.01 pu.

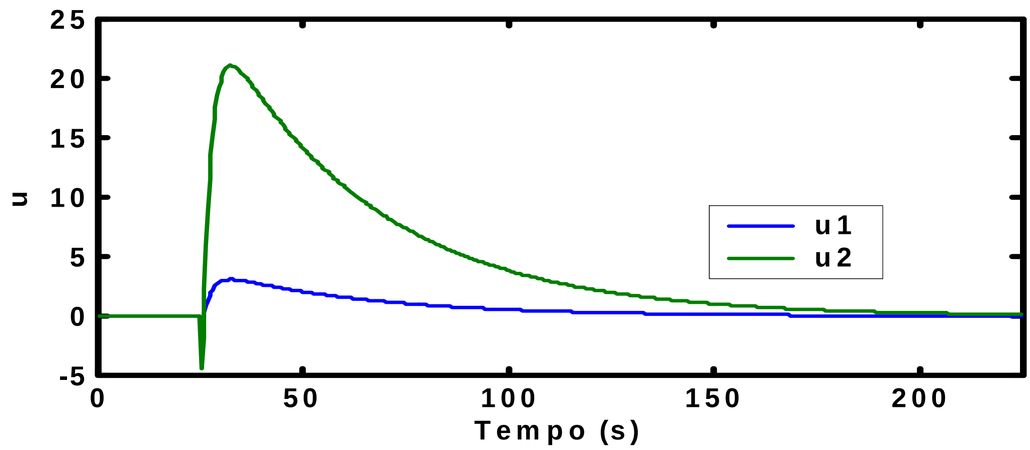
As saídas e o sinal de controle u2 apresentados na Figura C.4 satisfazem ao controle do processo. O sinal de controle u1 apresentou um esforço excessivo.

C.2.3 Problema regulador,com observador mínimo e com modelagem perfeita:

A Figura C.5 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente em problema regulador, com observador de estado de ordem mínima e com modelagem perfeita.



(a)



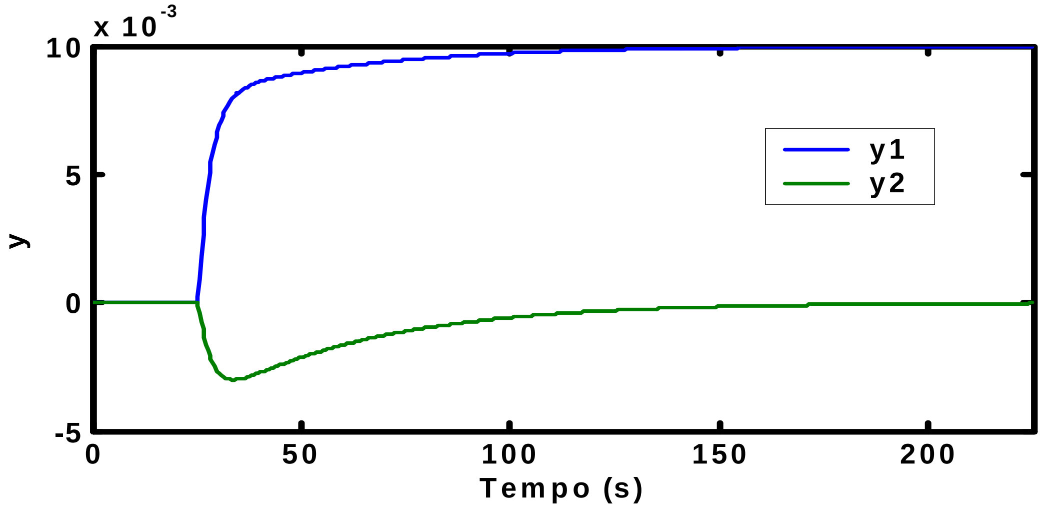
(b)

Figura C.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos.

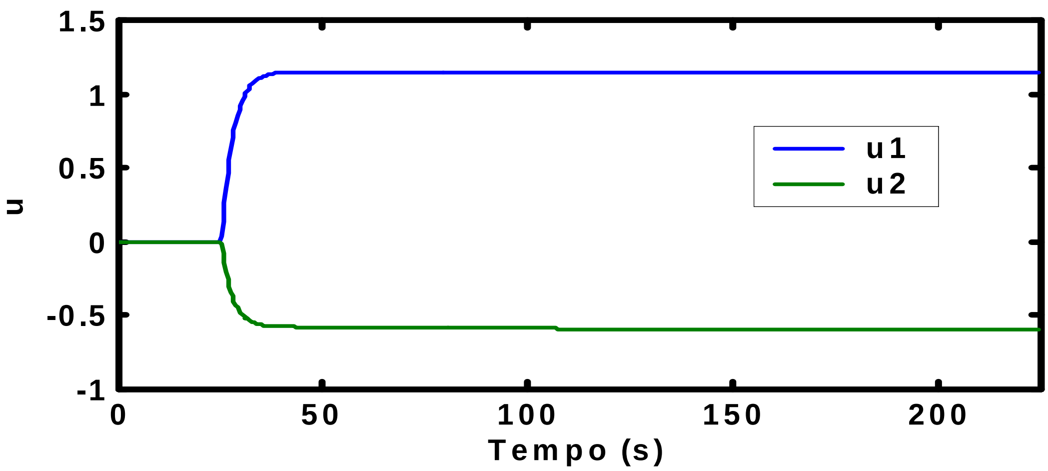
A Figura C.5 mostra que as saídas do sistema comportam-se como desejado, porém os sinais de controle possuem uma variação que ultrapassa os limites de variação fisicamente possíveis e com uma ação exagerada em relação à entrada, fazendo com que esta resposta não atenda as condições do controle do processo.

C.2.4 Problema servo,com observador mínimo e com modelagem perfeita:

A Figura C.6 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, com observador de estado de ordem mínima e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01pu na referência do laço de velocidade. As Figuras C.7 e C.8 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



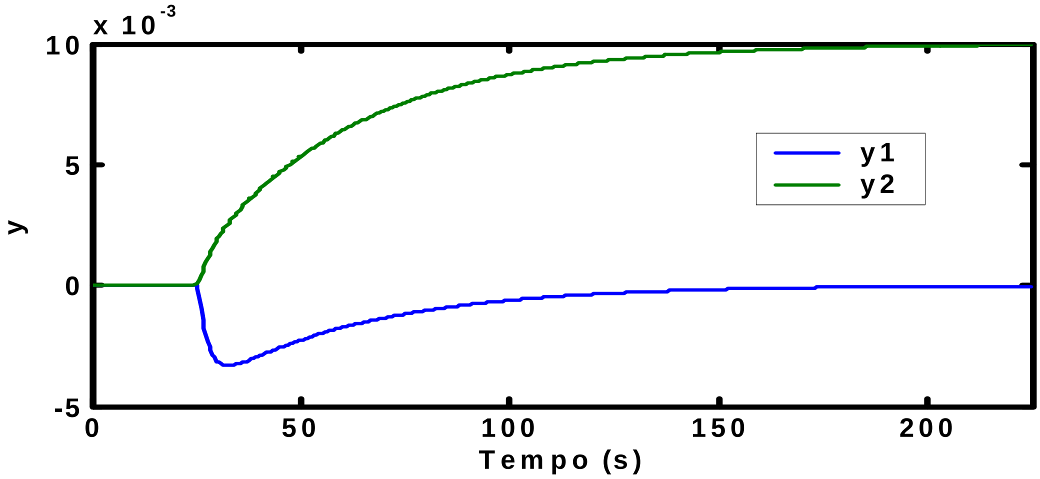
(a)



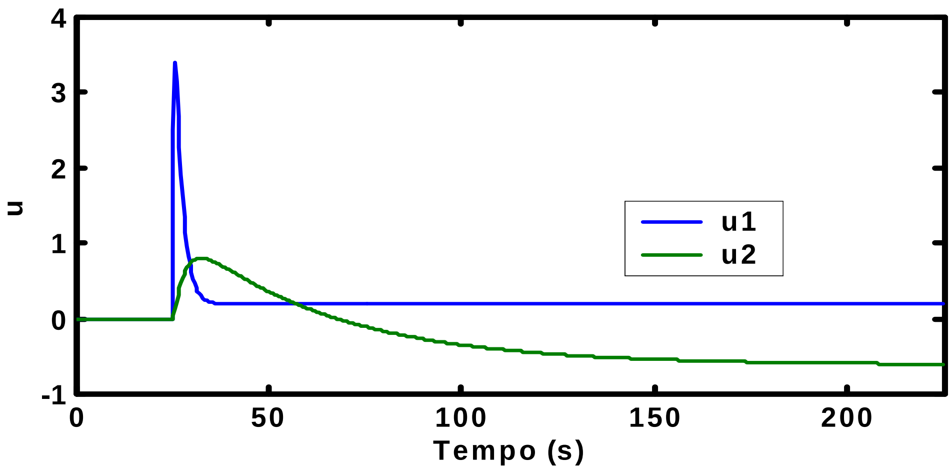
(b)

Figura C.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

A Figura C.6 demonstra que as saídas do sistema comportam-se como desejado, porém os sinais de controle possuem uma variação que ultrapassa os limites fisicamente possíveis e com uma ação exagerada em relação à entrada, fazendo com que esta resposta não atenda as condições do controle do processo.



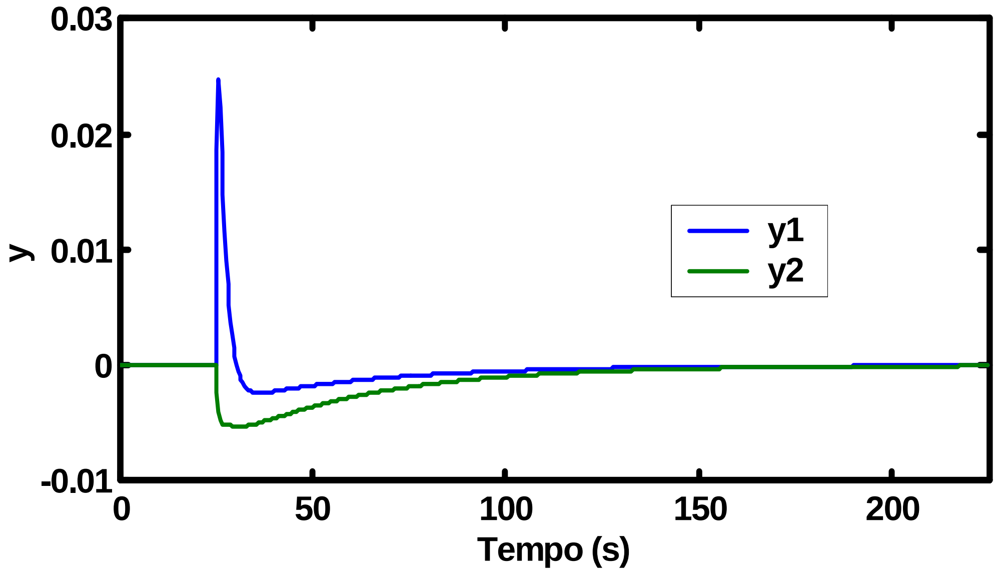
(a)



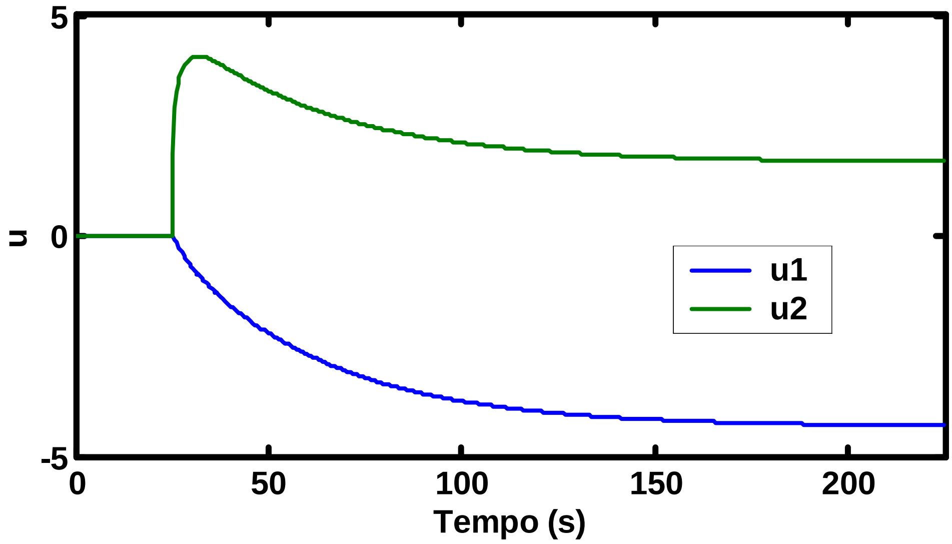
(b)

Figura C.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

A Figura C.7 demonstra que as saídas do sistema comportam-se como desejado, porém os sinais de controle possuem uma variação que ultrapassa os limites fisicamente possíveis e com uma ação exagerada em relação à entrada, fazendo com que esta resposta não atenda as condições do controle do processo.



(a)



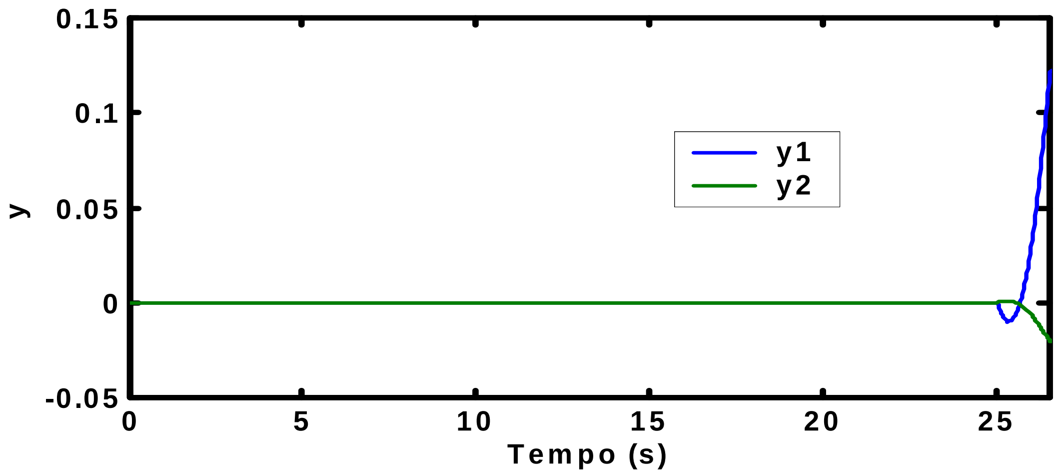
(b)

Figura C.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu.

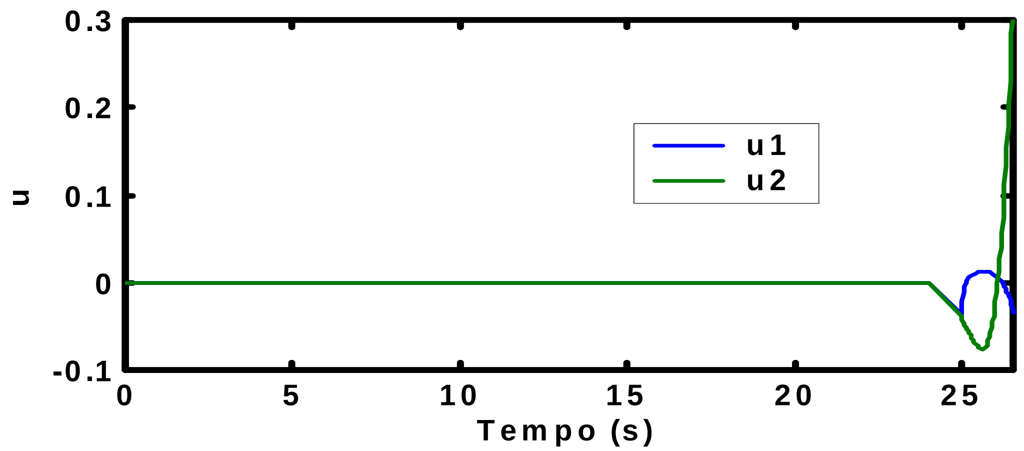
A Figura C.8 demonstra que as saídas do sistema comportam-se como desejado, porém os sinais de controle possuem uma variação que ultrapassa os limites fisicamente possíveis e com uma ação exagerada em relação à entrada, fazendo com que esta resposta não atenda as condições do controle do processo.

C.2.5 Problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo:

A Figura C.9 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para controlador atuando em problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo sujeito à condição inicial x_0. O gráfico é referente a pior condição apresentada para desvio planta modelo representativo da variação que a máquina sofre em operação interligada.



(a)



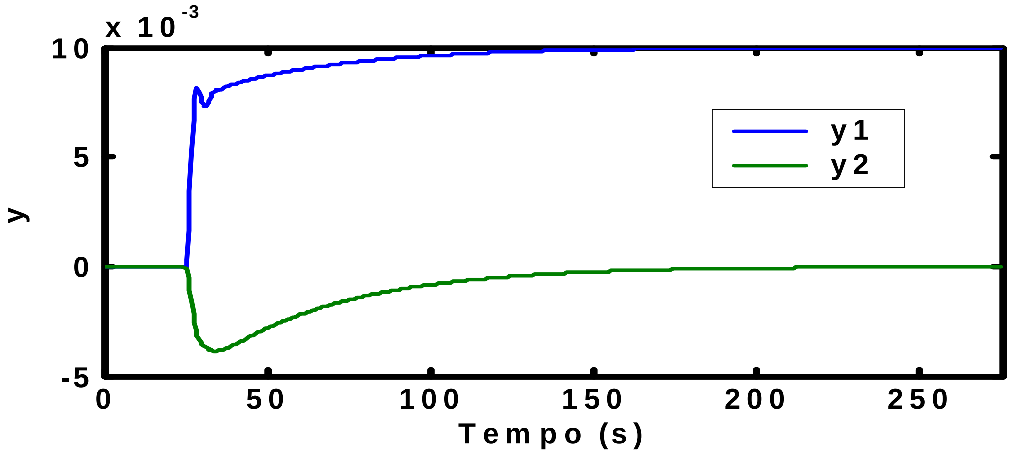
(b)

Figura C.9 – Curvas das saídas (**y**) e sinais de controle (**u**) para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos.

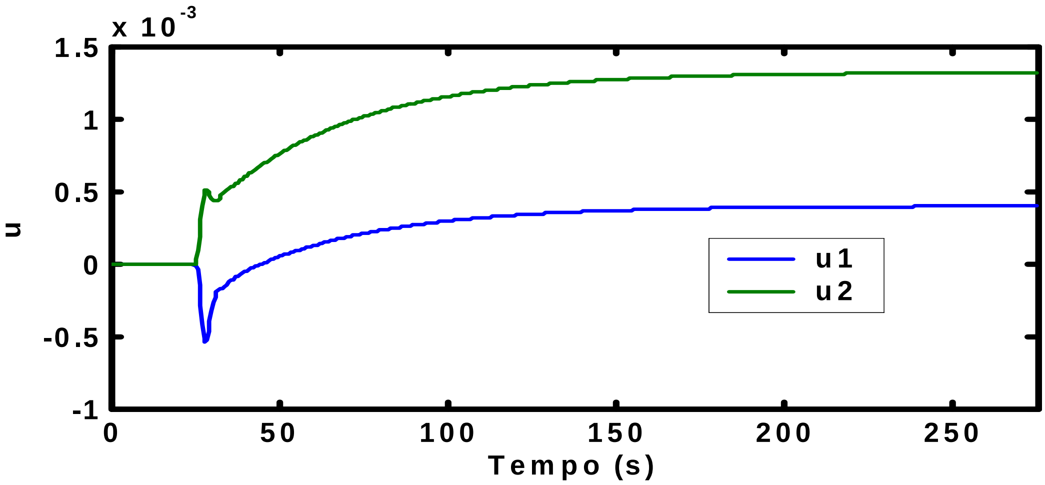
A Figura C.9 mostra que o sistema é instável quando submetido a um desvio planta/modelo em problema regulador.

C.2.6 Problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo:

A Figura C.10 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras C.11 e C.12 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (L) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



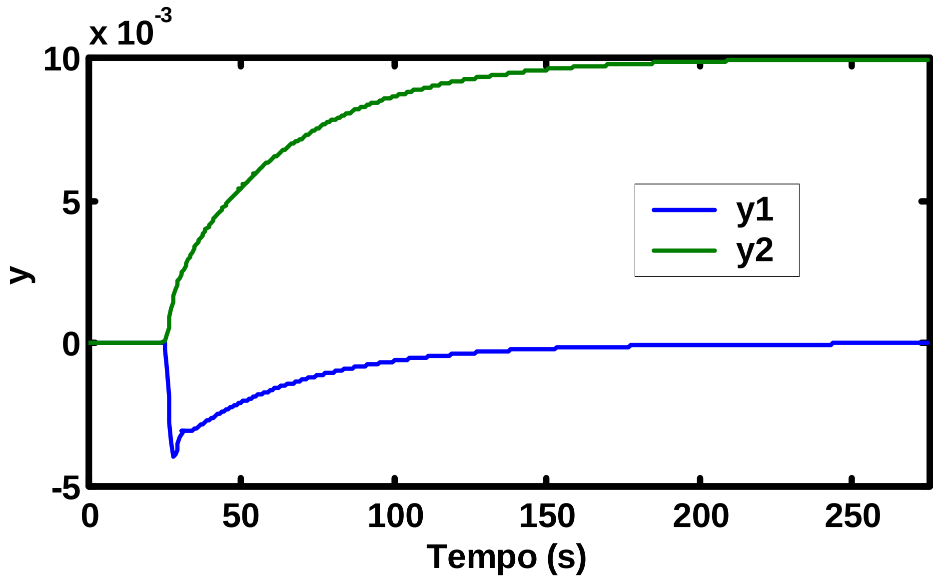
(a)



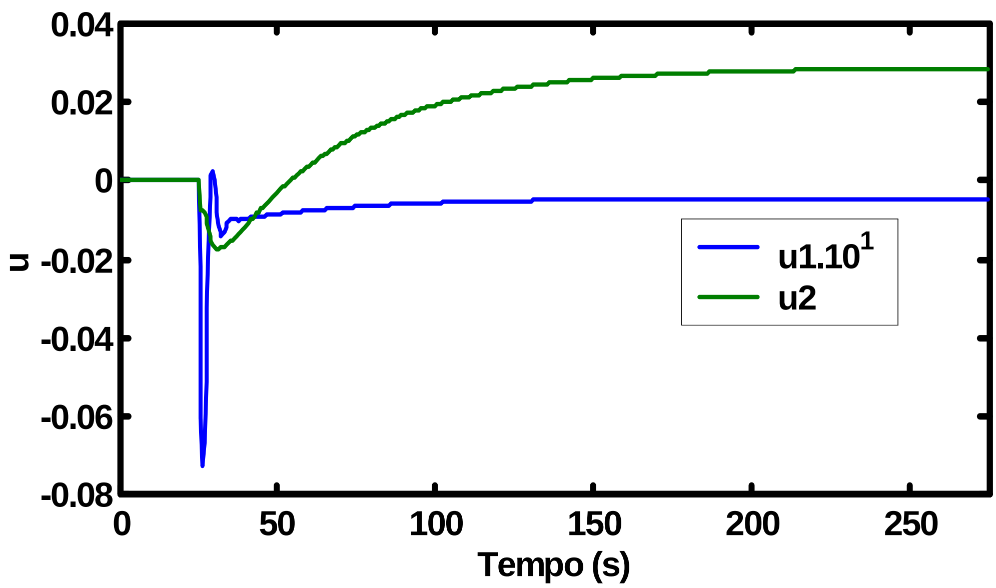
(b)

Figura C.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

A Figura C.10 mostra que as saídas e os sinais de controle satisfazem ao controle do processo.



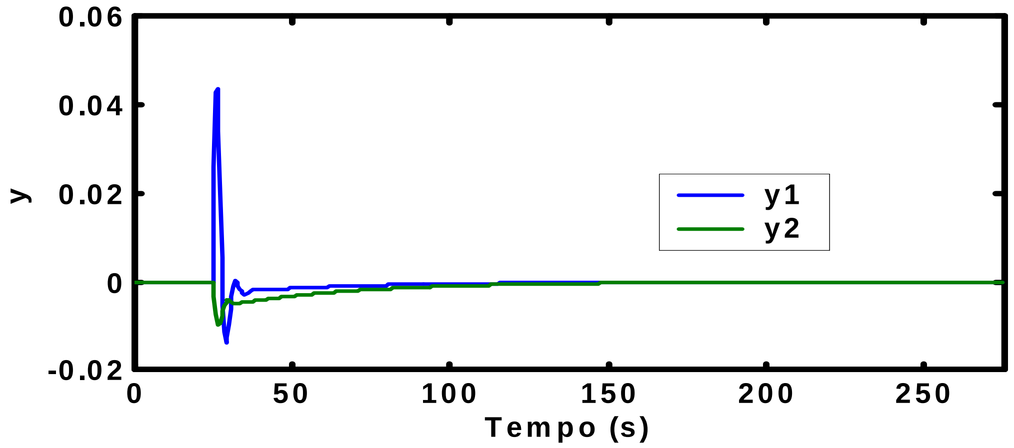
(a)



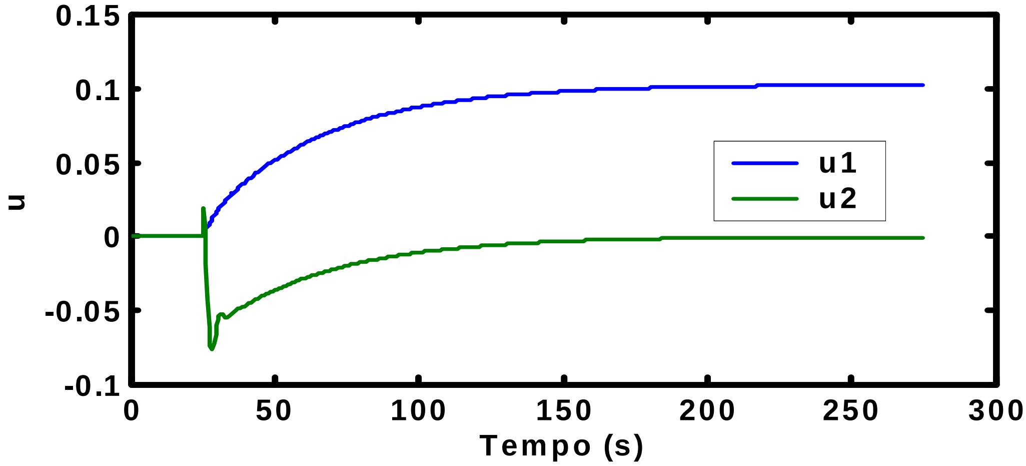
(b)

Figura C.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

As saídas e os sinais de controle apresentados na Figura C.11 atendem às condições do processo.



(a)



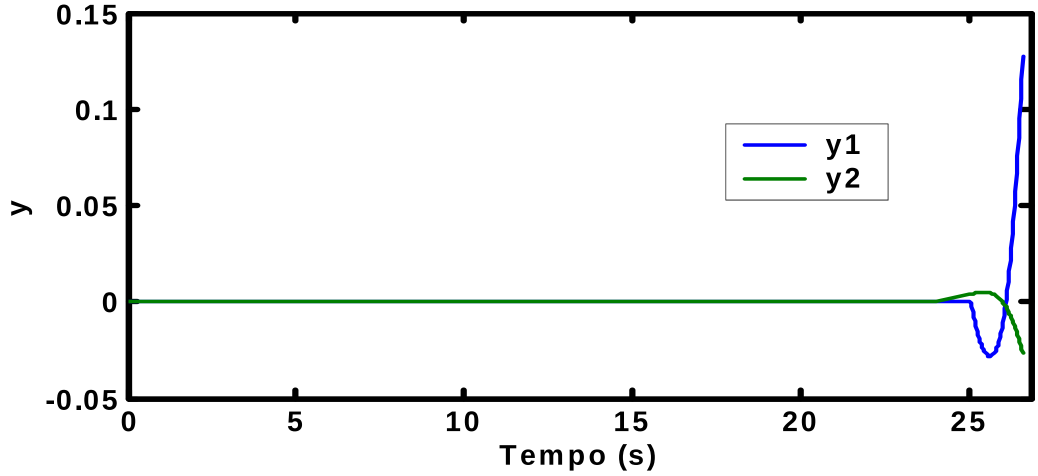
(b)

Figura C.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu.

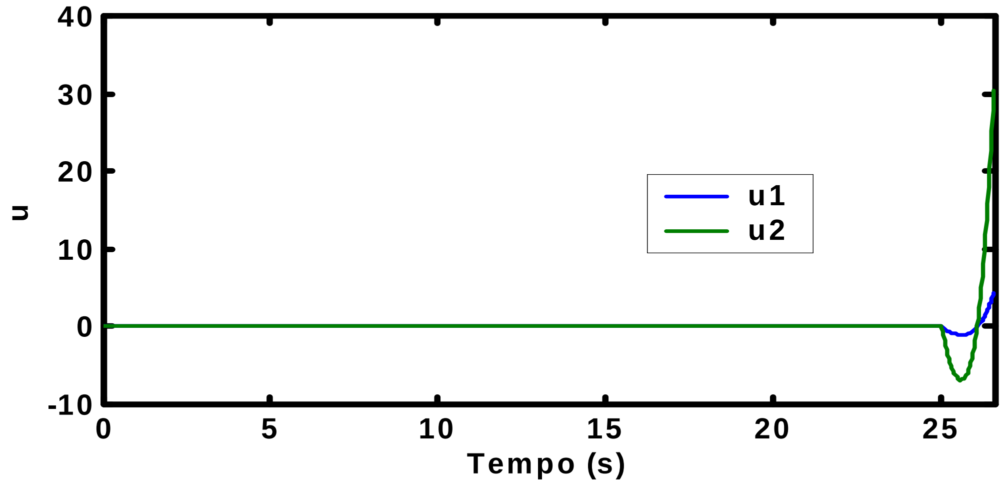
Na Figura C.12 pode-se observar que as saídas e o sinal de controle u2 atendem às condições do processo. O esforço do sinal de controle u1 apresentou-se desproporcional à perturbação no sistema.

C.2.7 Problema regulador, com observador mínimo e com desvio planta/modelo:

A Figura C.13 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo em problema regulador, com observador de estado de ordem mínima e com desvio planta/modelo.



(a)



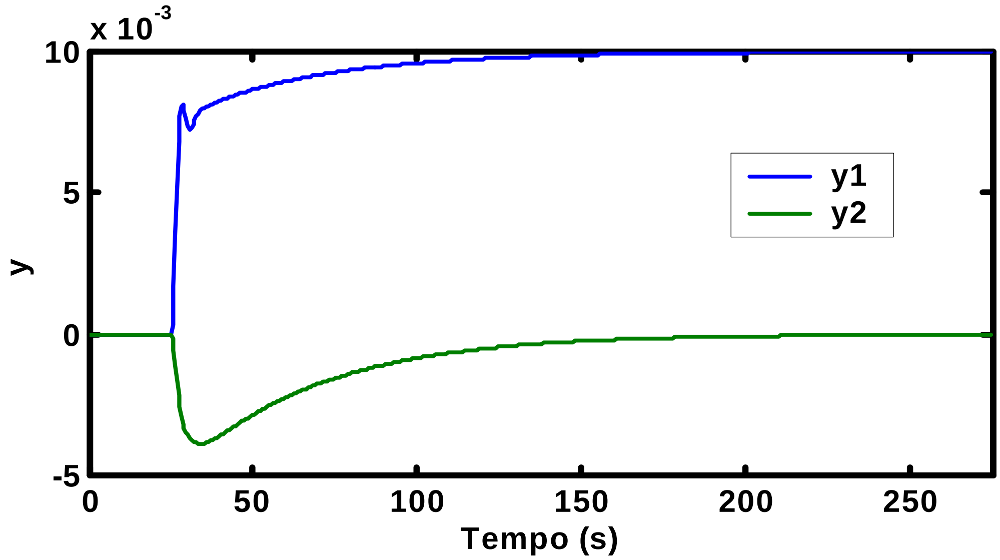
(b)

Figura C.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema regulador, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos.

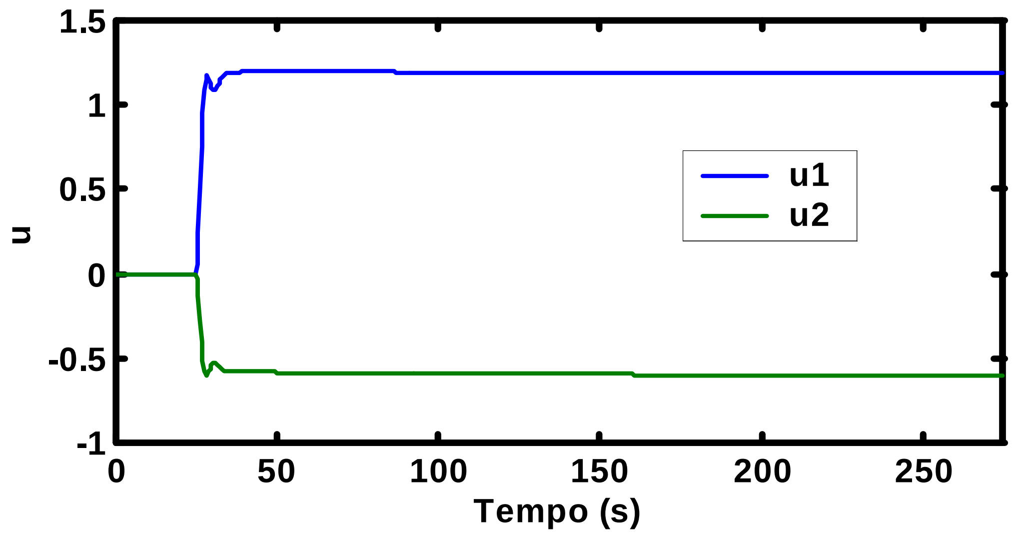
A Figura C.13 mostra que o sistema é instável para este caso.

C.2.8 Problema servo, com observador mínimo e com desvio planta/modelo:

A Figura C.14 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, com observador de estado de ordem mínima e com desvio planta/modelo, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras C.15 e C.16 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



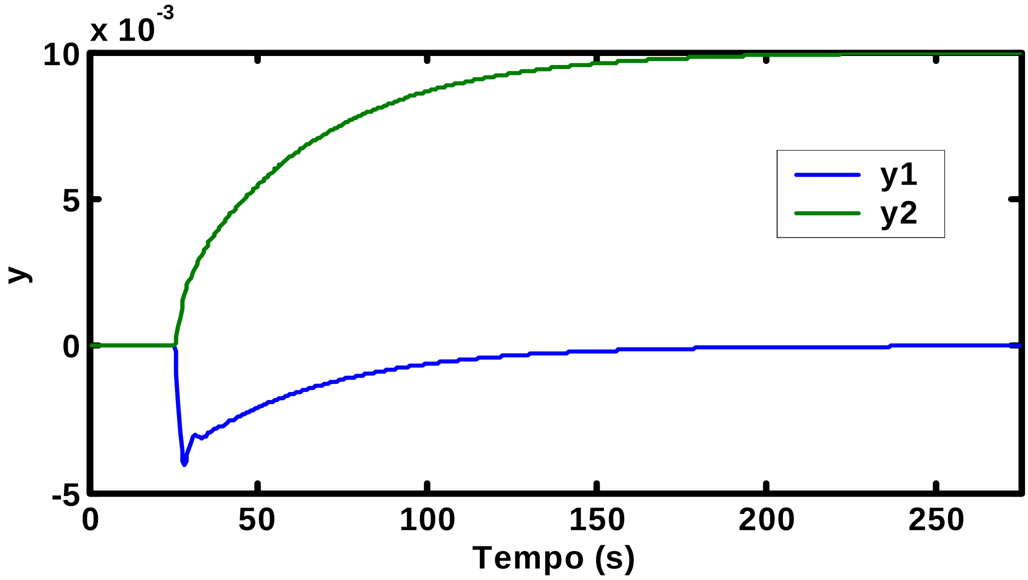
(a)



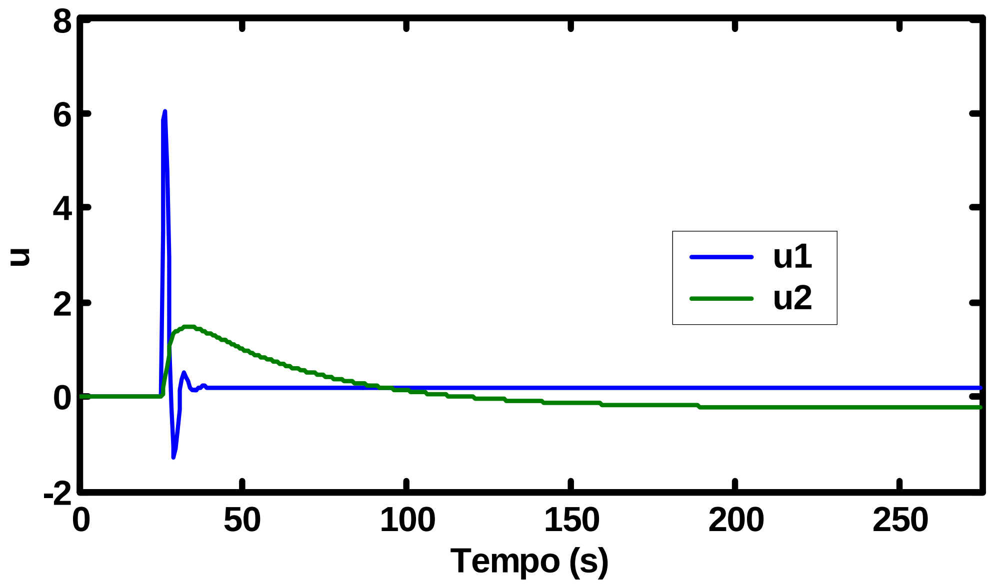
(b)

Figura C.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle (**u**), para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

A Figura C.14 mostra que as saídas satisfazem o processo. Os sinais de controle apresentam-se desproporcionais e incoerentes com degrau aplicado.



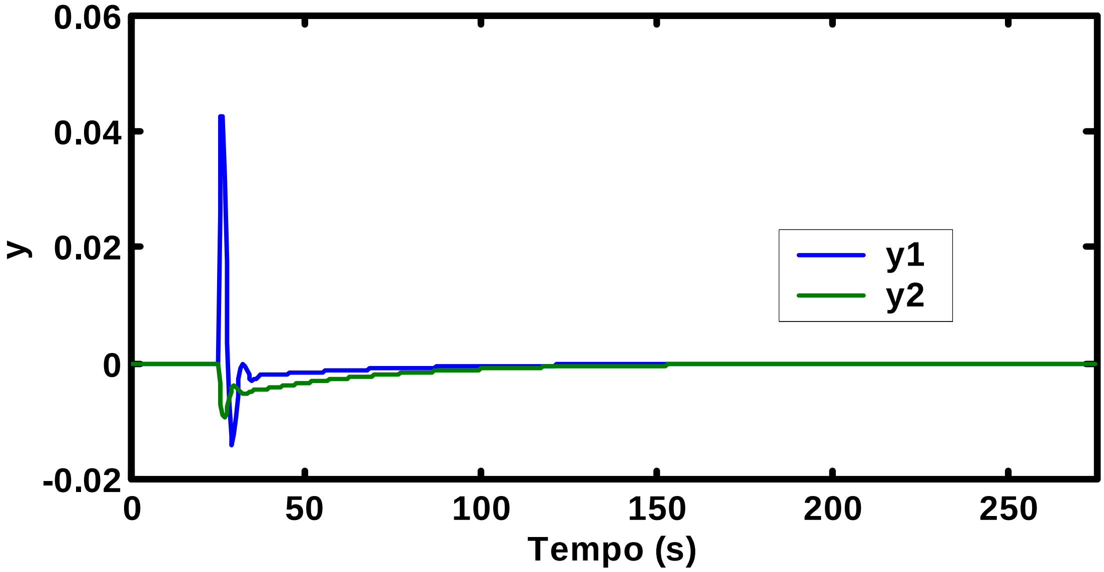
(a)



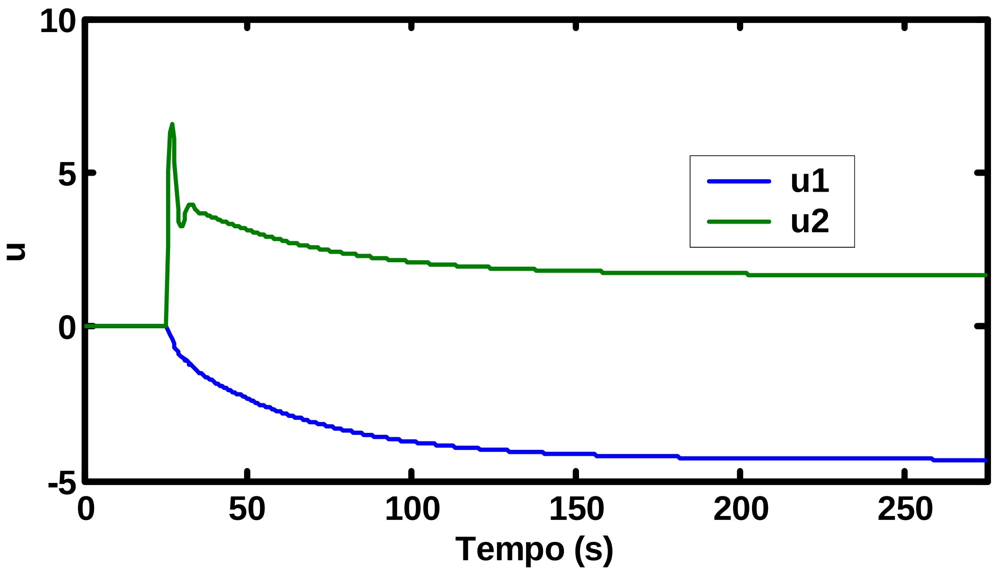
(b)

Figura C.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

A Figura C.15 mostra que as saídas satisfazem o processo. Os sinais de controle apresentam-se desproporcionais e incoerentes com degrau aplicado.



(a)



(b)

Figura C.16 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle por colocação de pólos. Carga de 0,01 pu.

A Figura C.16 mostra que as saídas e o sinal de controle u2 atendem as condições do processo. O sinal de controle u1 mostrou-se exagerado e incoerente com a carga.

ANEXO D – LISTA E GRÁFICOS DO CAPÍTULO 5

D.1 – Lista de Simulações

A Tabela D.1 mostra a listagem das simulações. A primeira coluna (Model.) refere-se a modelagem: planta igual ao modelo (P=M) ou planta diferente do modelo, que expressa o estudo de desvio planta/modelo (nP), onde n pode ser: 1a se a variação da planta for o limite inferior de K_1, ou seja, K_1 = 0,6 e 1b se a variação da planta for o limite superior de K_1, ou seja K_1= 1,15; 2a se a variação da planta em K_3 com K_3 = 0,15 e 2b se a variação na planta for em K_3, com K_3 = 0,45. A segunda coluna (Observ.) indica a presença ou não de observadores de estado e que tipo, se observador de ordem plena (OP) ou de ordem mínima (OM). A terceira coluna (Prob.) indica que tipo de problema foi estudado, servo (S) ou regulador (R). A quarta coluna (Matriz de Penalização) mostra as matrizes utilizadas para determinação das matrizes de ganho, onde **Q** e **R** são as matrizes utilizadas para resolução do problema regulador, **Qs** e **Rs** são as matrizes utilizadas para a resolução para o problema servo, **Qop** a matriz utilizada para resolução do problema com observador de estado de ordem plena e **Qom** a matriz utilizada para resolução do problema com observador de estado de ordem mínima. A coluna cinco (Saídas), mostra se as saídas são estáveis e satisfazem a operação d processo (AT) ou não atendem as condições de operação por apresentar instabilidade em alguma resposta ou variações desproporcionais das saídas (IS), dinâmica muito lenta ou rápida demais (DT) ou excessivo esforço na variável manipulada (ME).

A escolha das matrizes de penalização interfere decisivamente no bom desempenho do controlador e na resolução computacional. Assim a escolha destas matrizes é de fundamental importância. Geralmente estas matrizes são escolhidas na forma diagonal unitária, como mostrou GOMES (1987) e usada na primeira linha da Tabela D.1. Apesar de ser uma forma básica, na maioria dos casos esta condição satisfaz as exigências de estabilidade do sistema. A matriz usada na 6ª linha da Tabela D.1, foi baseada na regra empírica que leva em consideração as variações máximas a que estados podem ser submetidos, a chamada regra de Bryson, indica por FRANKLIN (1980). Os valores das variações máximas encontram-se na Tabela D.2.

TABELA D.1: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR CONTROLE ÓTIMO.

Model.	Observ	Prob.	Matrizes de Penalização	Saídas
P=M	Não	R	***R= I_2e Q=I_6***	***AT***
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=**I_6***0,1	AT
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=**I_6***0,01	AT
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=**I_6***10	AT
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=**I_6***100	AT
P=M	Não	R	**R** =**I_2***0,82644 e **Q**=[0,82644 0 0 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 0 0;0 0 0,82644 0 0 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0 0 0;0 0 0 0 0,082644 0 0 0; 0 0 0 0 0 0,82644 0 0]	AT
P=M	Não	R	**R** =**I_2***0,82644 e **Q**=[0,82644 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 ;0 0 0,82644 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0;0 0 0 0 0,082644 0;0 0 0 0 0 0,82644]*100	AT
P=M	Não	R	**R** =**I_2***0,82644 e **Q**=[0,82644 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 ;0 0 0,82644 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0;0 0 0 0 0,082644 0;0 0 0 0 0 0,82644]*0,01	AT
P=M	Não	R	**R** =**I_2***0,82644*100 e **Q**=[0,82644 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 ;0 0 0,82644 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0;0 0 0 0 0,082644 0;0 0 0 0 0 0,82644]*10	AT
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 10 0 0 0; 0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0 0 0 10]	AT
P=M	Não	R	**R** = **I_2** e **Q**=[1 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0; 0 0 0 10 0 0;0 0 0 0 1 0;0 0 0 0 0 10]	AT
P=M	Não	S	***Rs= I_2e Qs=I_8***	***AT***
P=M	Não	S	**Rs** =**I_2***0,82644 e **Qs**=[0,82644 0 0 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 0 0;0 0 0,82644 0 0 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0 0 0;0 0 0 0 0,082644 0 0 0;0 0 0 0 0 0,82644 0 0;0 0 0 0 0 0 0,82644 0;0 0 0 0 0 0 0 0,82644]	AT
P=M	Não	S	**Rs** =**I_2***0,82644 e **Qs**=[0,82644 0 0 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 0 0;0 0 0,82644 0 0 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0 0 0;0 0 0 0 0,082644 0 0 0;0 0 0 0 0 0,82644 0 0;0 0 0 0 0 0 1 0;0 0 0 0 0 0 0 1]	AT
P=M	Não	S	**Rs** =**I_2***0,82644*100 e **Qs**=[0,82644 0 0 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 0 0;0 0 0,82644 0 0 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0 0 0;0 0 0 0 0,082644 0 0 0; 0 0 0 0 0 0,82644 0 0]	AT
P=M	Não	S	**Rs** =**I_2***0,82644*10 e **Qs**=[0,82644 0 0 0 0 0 0 0;0 0,82644 0 0 0 0 0 0;0 0 0,82644 0 0 0 0 0;0 0 0 1,6436 0 0 0 0;0 0 0 0 0,082644 0 0 0;0 0 0 0 0 0,82644 0 0]*100	AT
1aP	Não	R/S	**R**= **I_2**e **Q**=**I_6** e **Rs**= **I_2**e **Qs**=**I_8**	AT
1bP	Não	R/S	**R**= **I_2**e **Q**=**I_6** e **Rs**= **I_2**e **Qs**=**I_8**	AT
2aP	Não	R/S	**R**= **I_2**e **Q**=**I_6** e **Rs**= **I_2**e **Qs**=**I_8**	AT
2bP	Não	R/S	**R**= **I_2**e **Q**=**I_6** e **Rs**= **I_2**e **Qs**=**I_8**	AT
			Observador de ordem plena	
P=M	OP	R/S	**R**= **I_2**e **Q**=**I_6** e **Rs**= **I_2**e **Qs**=**I_8** e **Qop**= **I_6***10	AT
P=M	OP	R/S	***R= I_2e Q=I_6 e Rs= I_2e Qs=I_8 e Qop =I_6*100***	***AT***

Continua

Continuação

1aP	OP	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qop=**$\mathbf{I_6}$*100	AT
1bP	OP	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qop=**$\mathbf{I_6}$*100	AT
2aP	OP	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qop=**$\mathbf{I_6}$*100	AT
2bP	OP	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qop=**$\mathbf{I_6}$*100	AT
			Observador de ordem mínima	
P=M	OM	S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qom=** $\mathbf{I_2}$*10	AT
P=M	OM	S	***R= I_2e Q=I_6 e Rs= I_2e Qs=I_8 e Qom= I_2*100***	***AT***
1aP	OM	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qom=** $\mathbf{I_2}$*100	AT
1bP	OM	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qom=** $\mathbf{I_2}$*100	AT
2aP	OM	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qom=** $\mathbf{I_2}$*100	AT
2bP	OM	R/S	**R**= $\mathbf{I_2}$e **Q**=$\mathbf{I_6}$ e **Rs**= $\mathbf{I_2}$e **Qs**=$\mathbf{I_8}$ e **Qom=** $\mathbf{I_2}$*100	AT

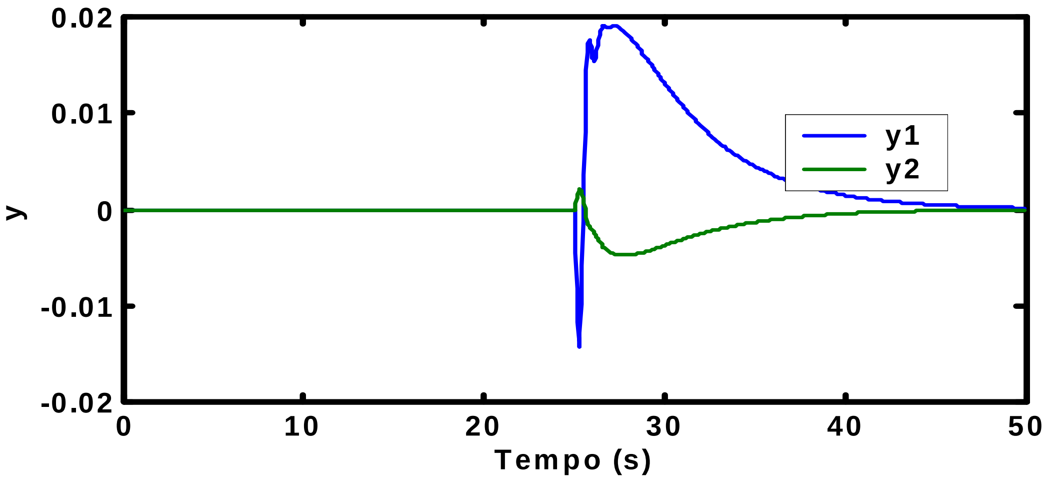
TABELA D.2: LISTA DE SIMULAÇÕES REALIZADAS PARA O ESTUDO DE CONTROLE POR CONTROLE ÓTIMO.

Estado(x)	Variação Máxima (pu)
x_1	1,1 pu
x_2	1,1 pu
x_3	1,1 pu
x_4	45 graus ou 0,78 rad
x_5	1,1 pu
x_6	1,1 pu
Entradas(u)	
u_1	1 pu
u_2	1,1 pu

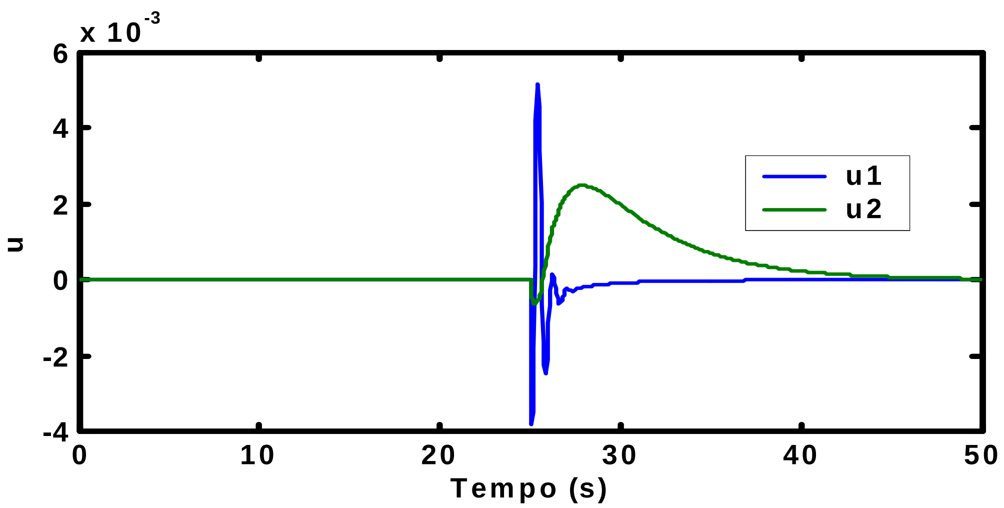
D.2 Gráficos

D.2.1 Problema regulador, com observador pleno e com modelagem perfeita:

A Figura D.1 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente



(a)



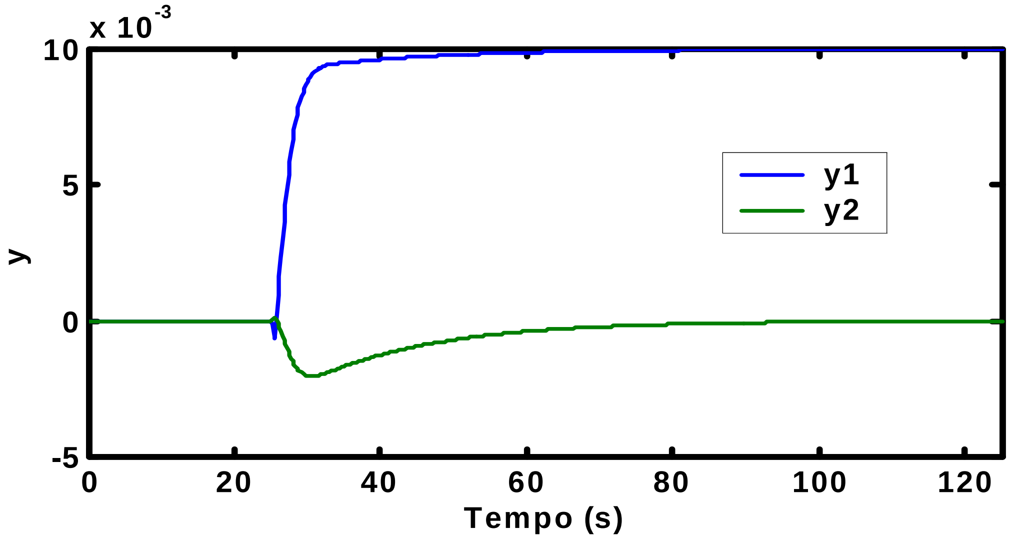
(b)

Figura D.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo.

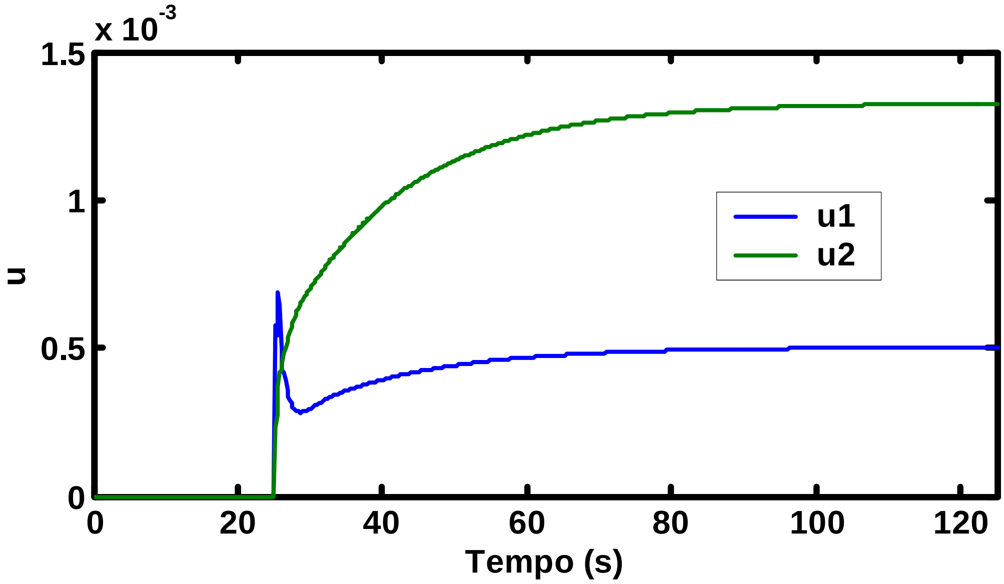
Na Figura D.1 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

D.2.2 Problema servo,com observador pleno e com modelagem perfeita:

A Figura D.2 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para controlador atuando em problema servo, com observador de estado de ordem plena e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01 na referência do laço de velocidade. As Figuras D.3 e D.4 mostram os resultados para degrau de 0,01 na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



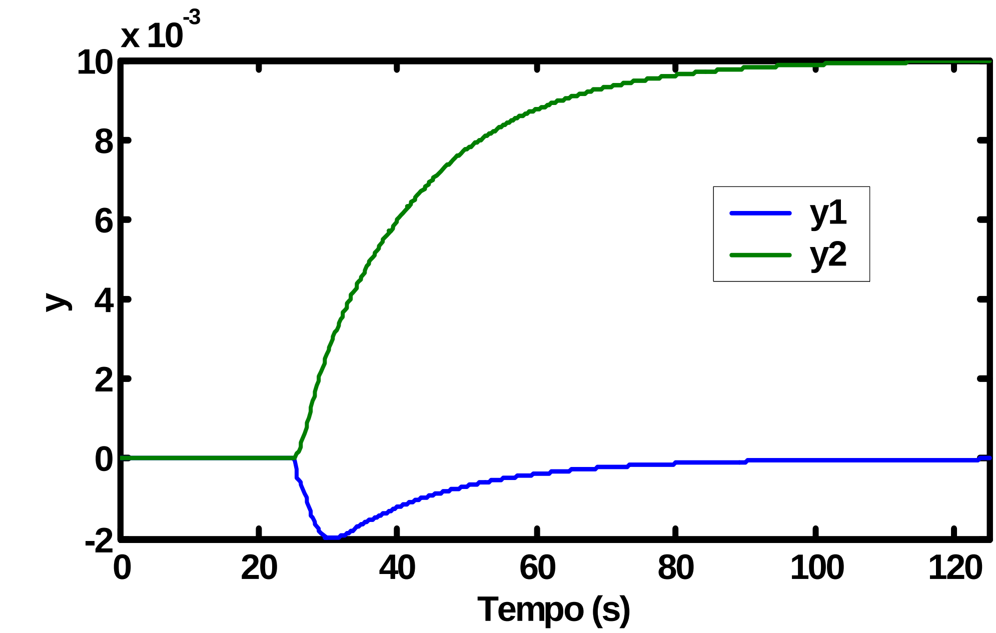
(a)



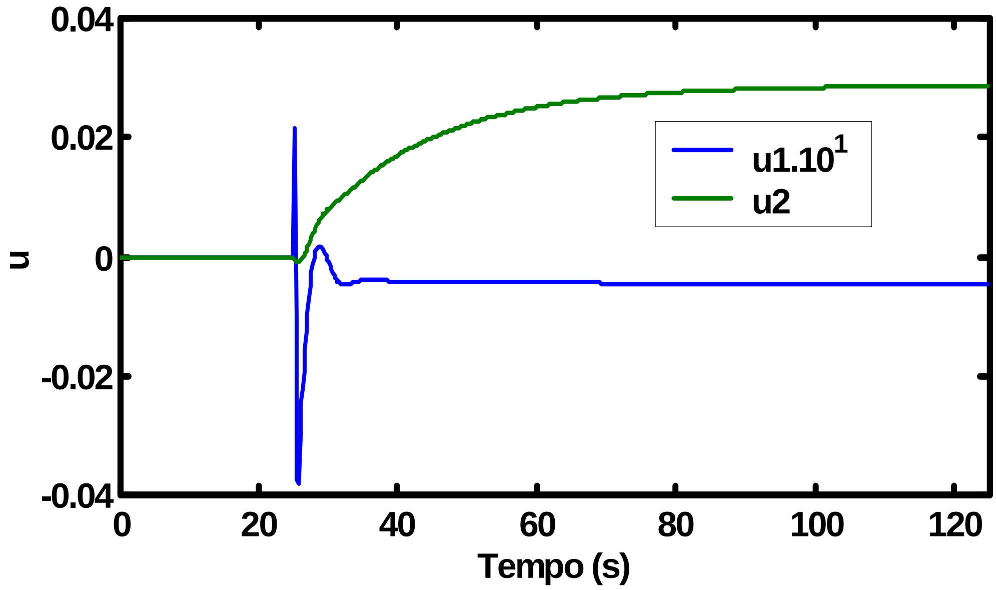
(b)

Figura D.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Na Figura D.2 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.



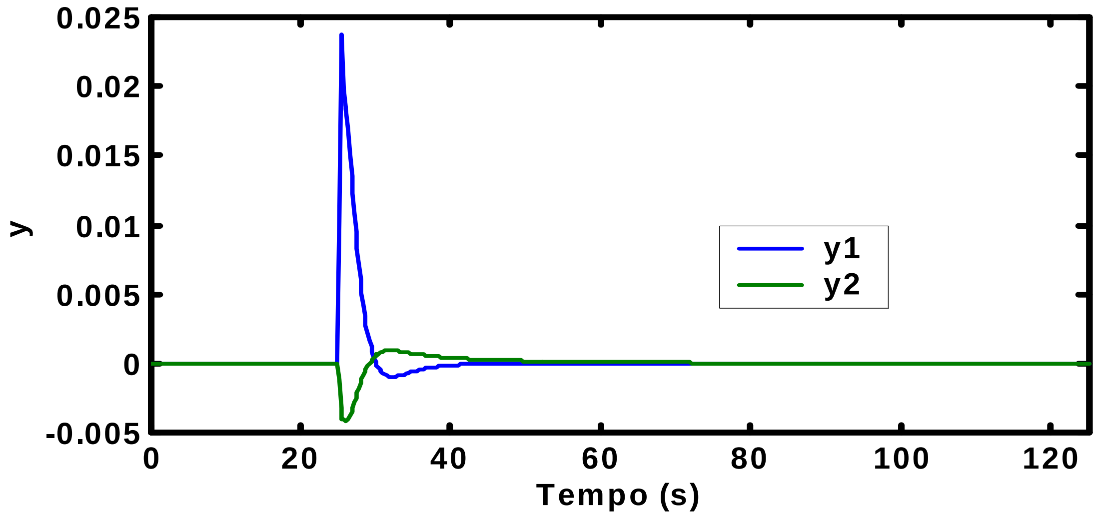
(a)



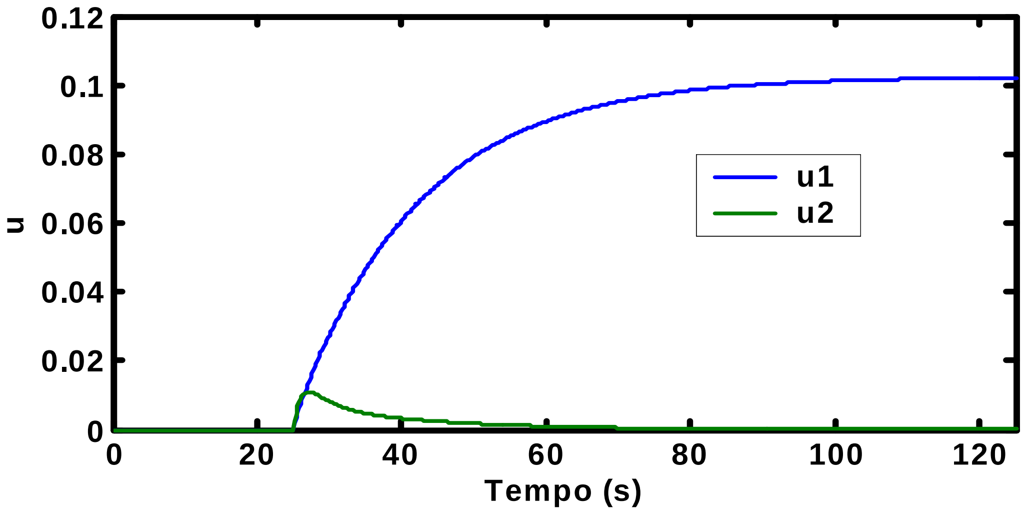
(b)

Figura D.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura D.3 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.



(a)



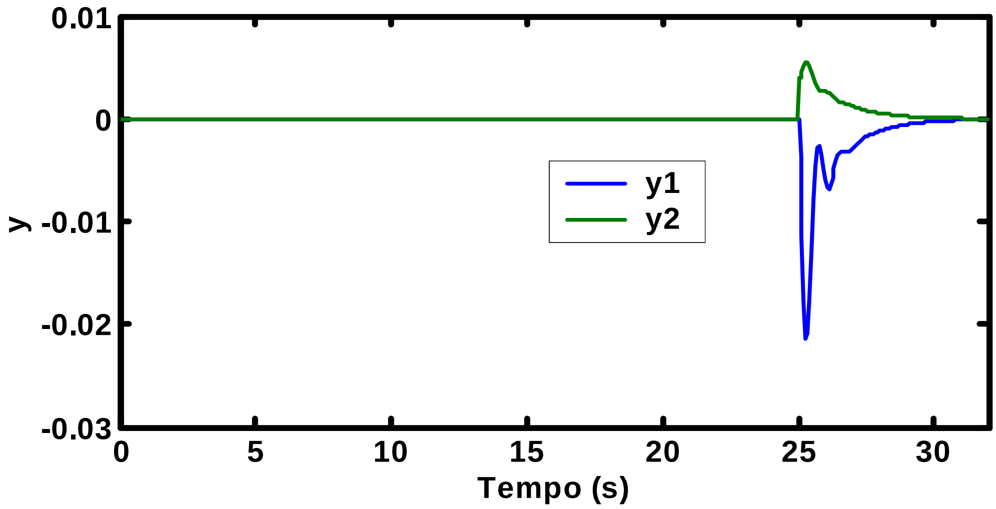
(b)

Figura D.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem plena, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

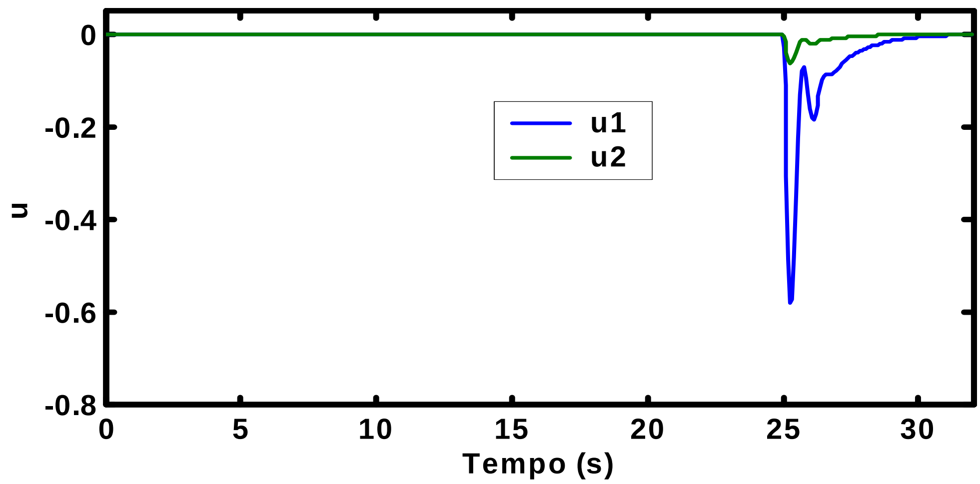
Na Figura D.4 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado frente a uma entrada de carga no sistema, ou seja, são ajustadas de forma a retornar no valor inicial ou de ajuste de *setpoint*. O sinal de controle u2 (tensão de campo) apresenta valor razoável, porém para u1 (abertura do distribuidor) o esforço apresenta-se demasiadamente excessivo.

D.2.3 Problema regulador, com observador mínimo e com modelagem perfeita:

A Figura D.5 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo respectivamente em problema regulador, com observador de estado de ordem mínima e com modelagem perfeita.



(a)



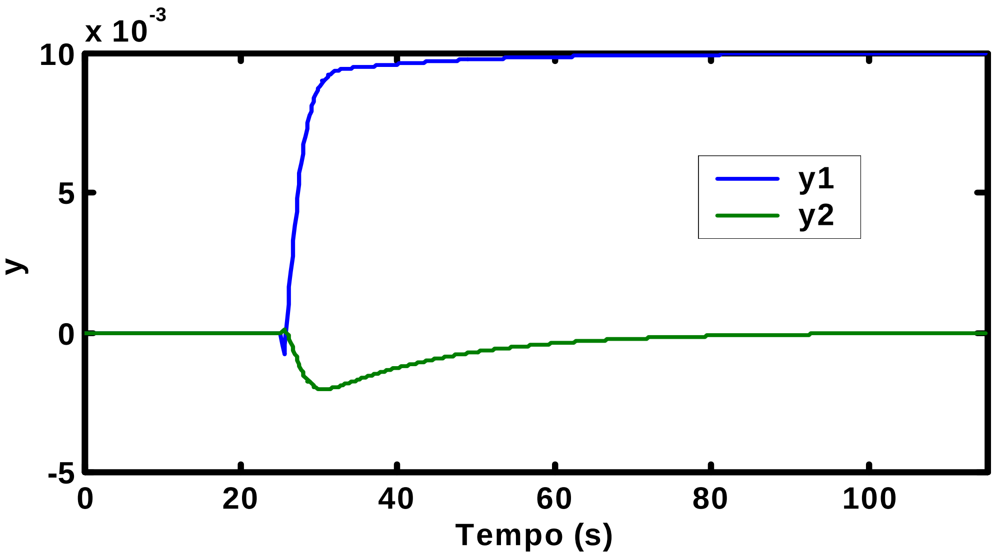
(b)

Figura D.5 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo.

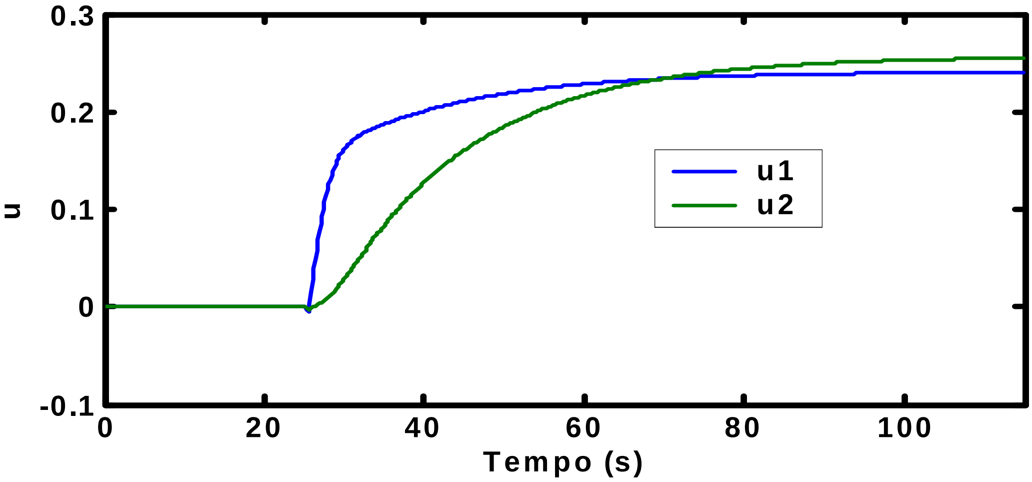
Na Figura D.5 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores excessivos não atendendo ao processo.

D.2.4 Problema servo, com observador mínimo e com modelagem perfeita:

A Figura D.6 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, com observador de estado de ordem mínima e com modelagem perfeita, aplicando-se degrau de 0,01pu na referência do laço de velocidade. As Figuras D.7 e D.8 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



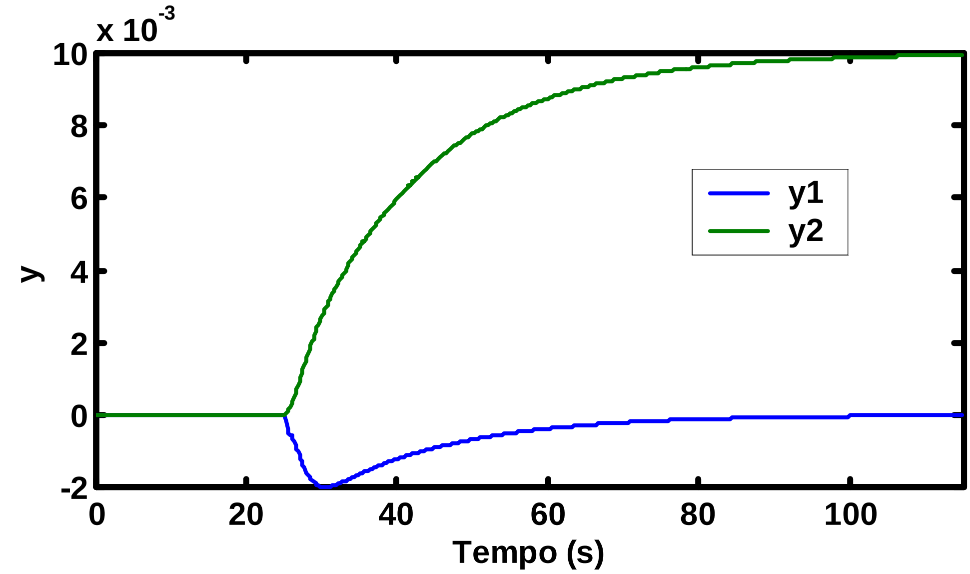
(a)



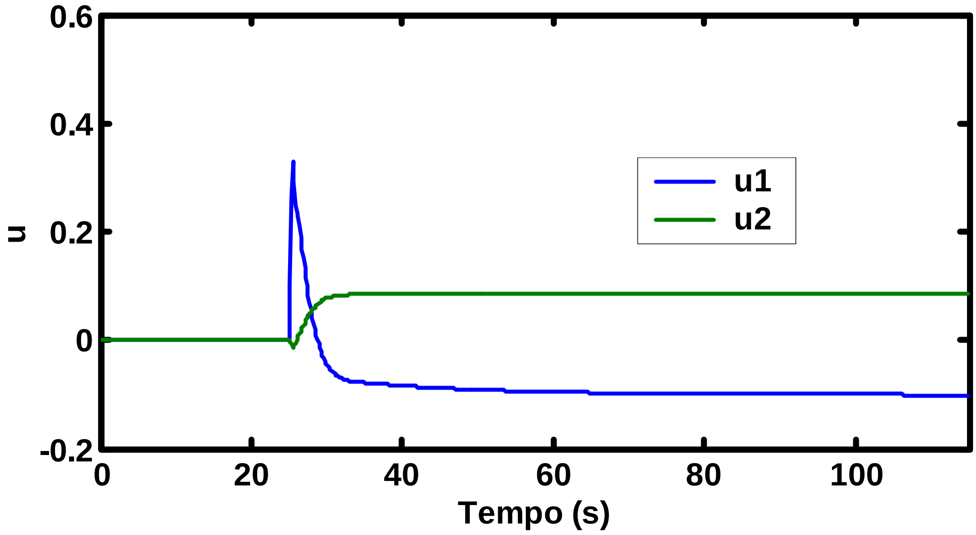
(b)

Figura D.6 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Na Figura D.6 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores excessivos não atendendo ao processo.



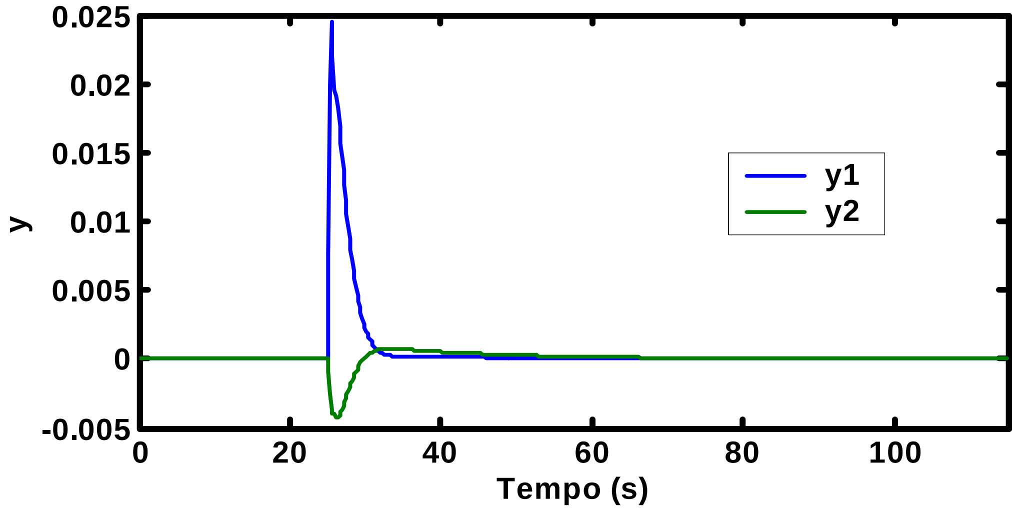
(a)



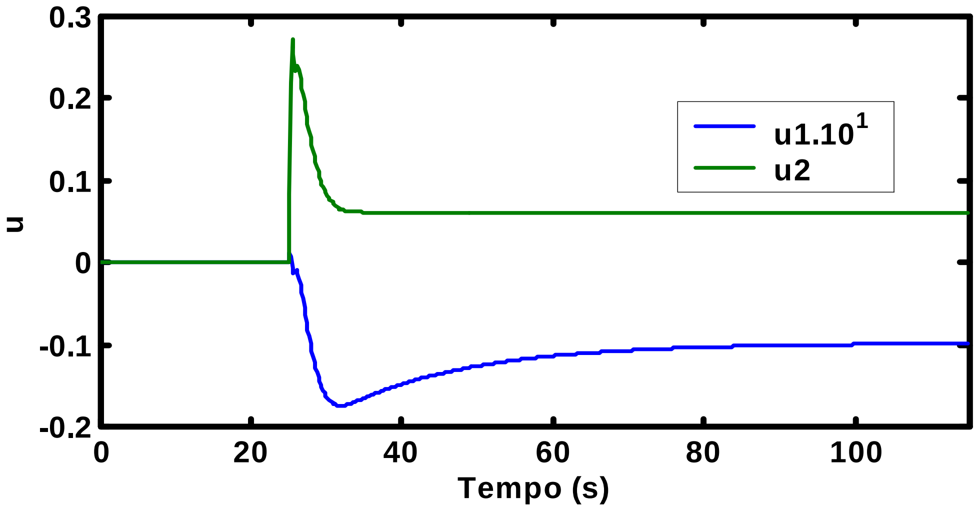
(b)

Figura D.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura D.7 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores excessivos não atendendo ao processo.



(a)



(b)

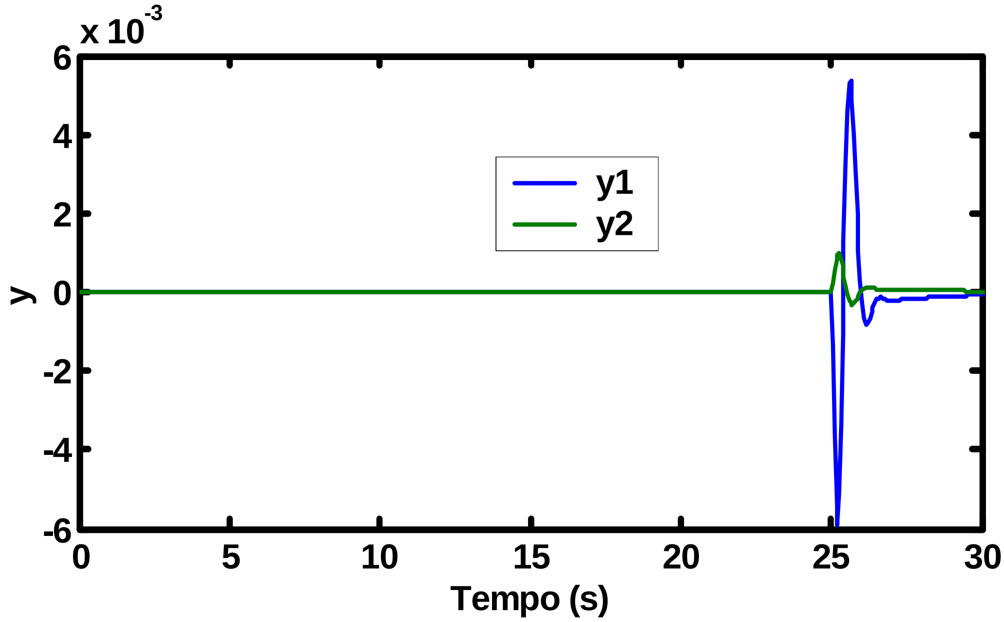
Figura D.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador de ordem mínima, com modelagem perfeita e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

Na Figura D.8 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis, atendendo ao processo.

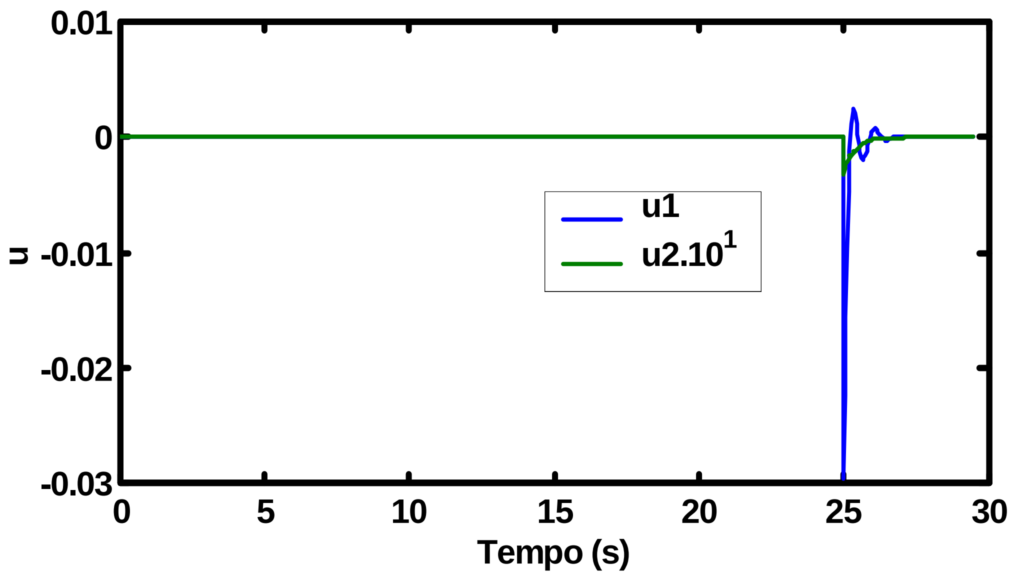
D.2.5 Problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo:

A Figura D.9 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para controlador atuando em problema regulador, sem observador de estado e com desvio planta/modelo

sujeito à condição inicial x_0. O gráfico é referente a pior condição apresentada para desvio planta modelo representativo da variação que a máquina sofre em operação interligada.



(a)



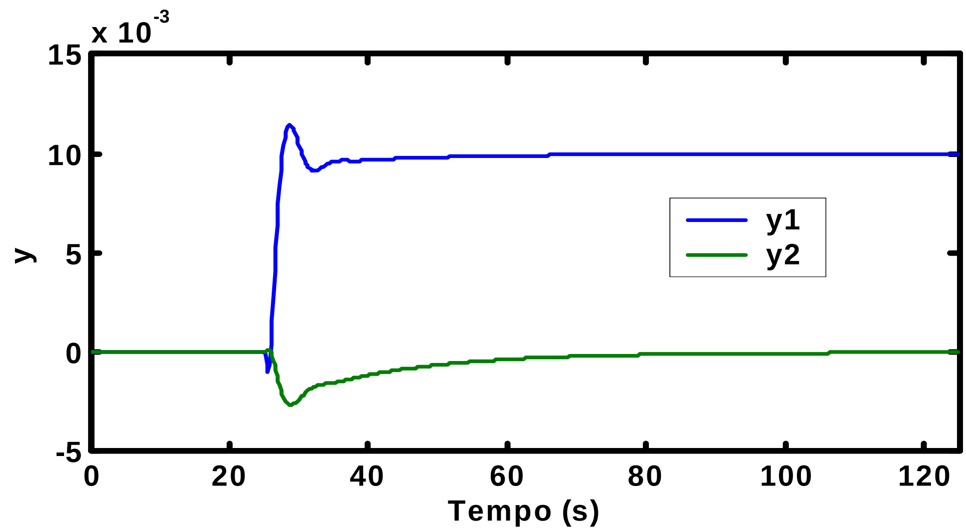
(b)

Figura D.9 – Curvas das saídas (**y**) e sinais de controle para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo.

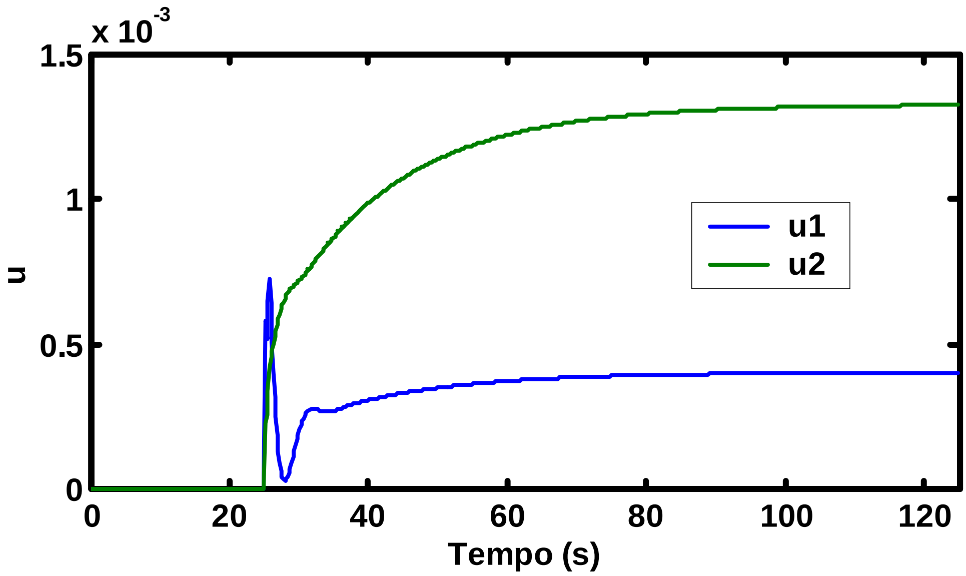
Na Figura D.9 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis, atendendo ao processo.

D.2.6 Problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo:

A Figura D.10 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, sem observador de estado e com desvio planta/modelo, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras D.11 e D.12 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (L) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



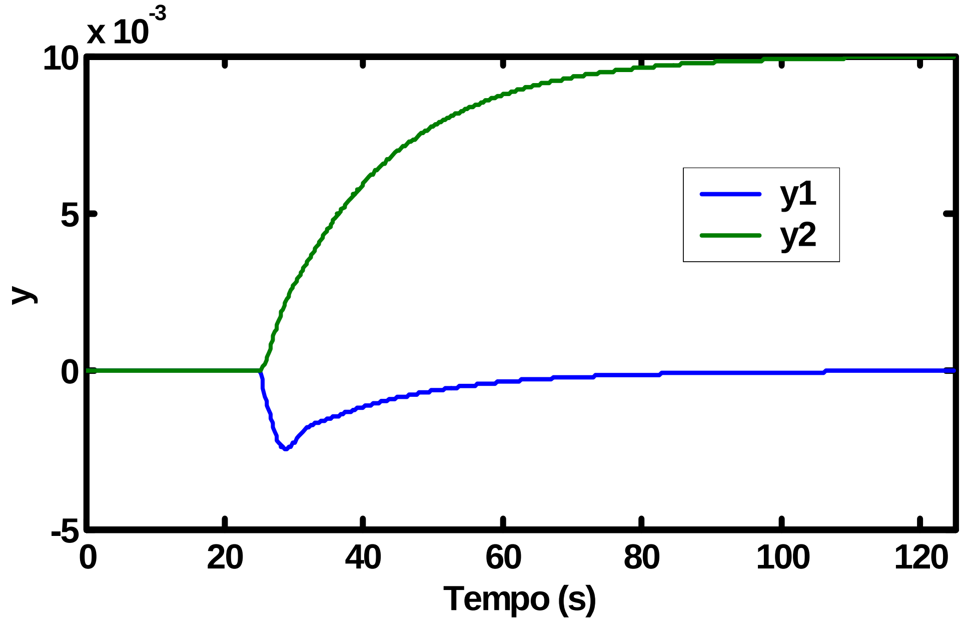
(a)



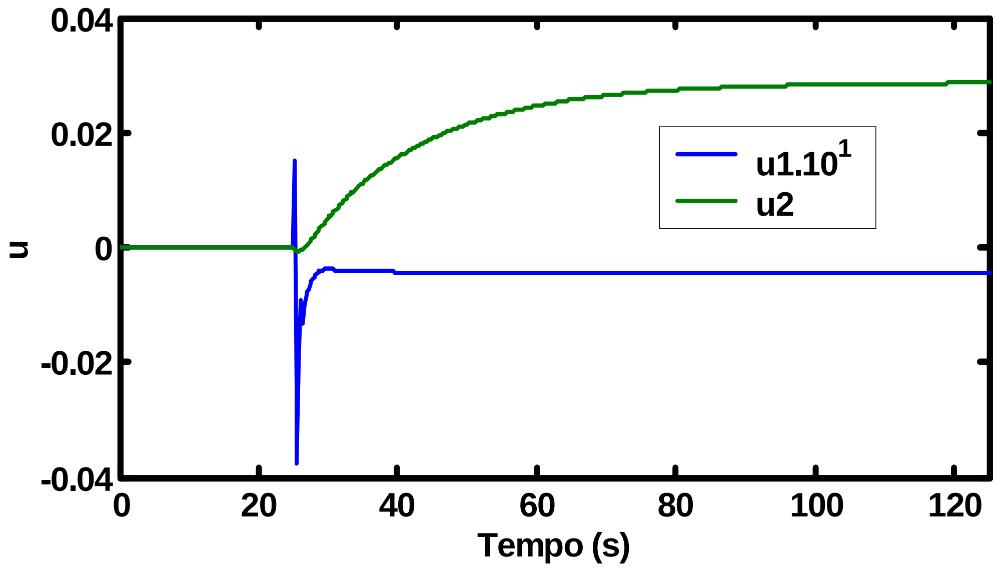
(b)

Figura D.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Na Figura D.10 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis, atendendo ao processo.



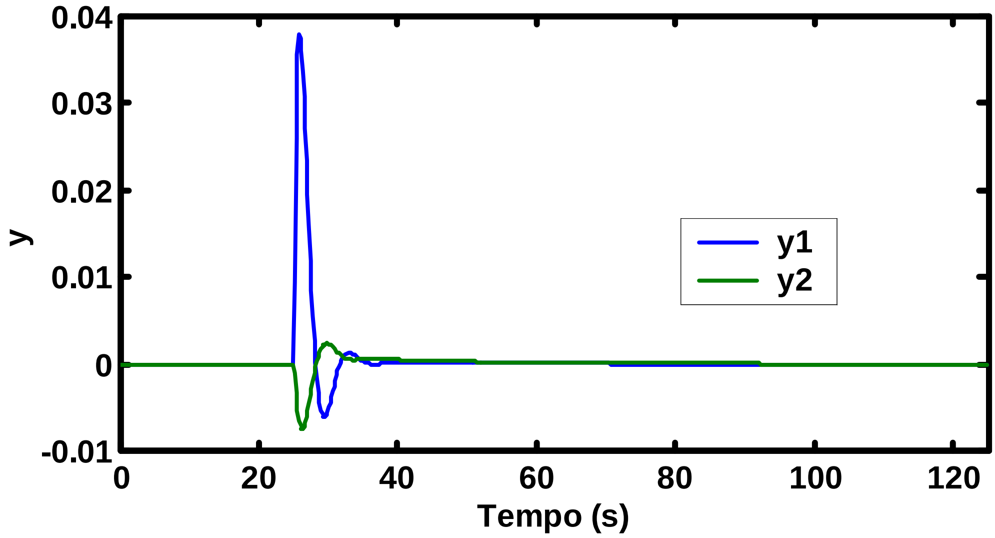
(a)



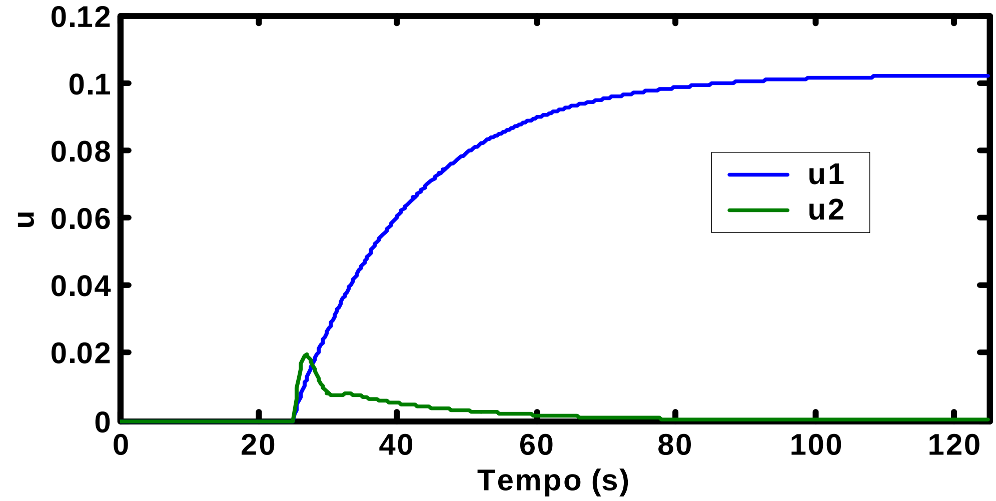
(b)

Figura D.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

Na Figura D.11 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis, atendendo ao processo.



(a)



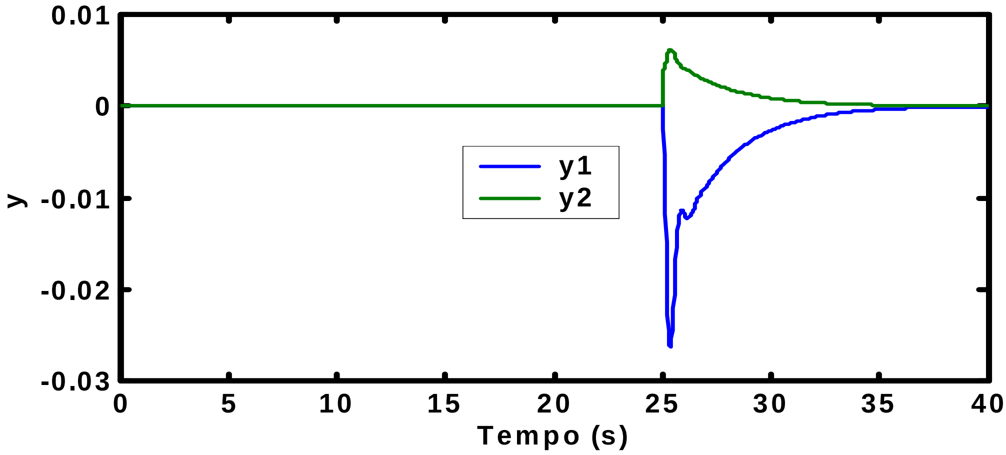
(b)

Figura D.12 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

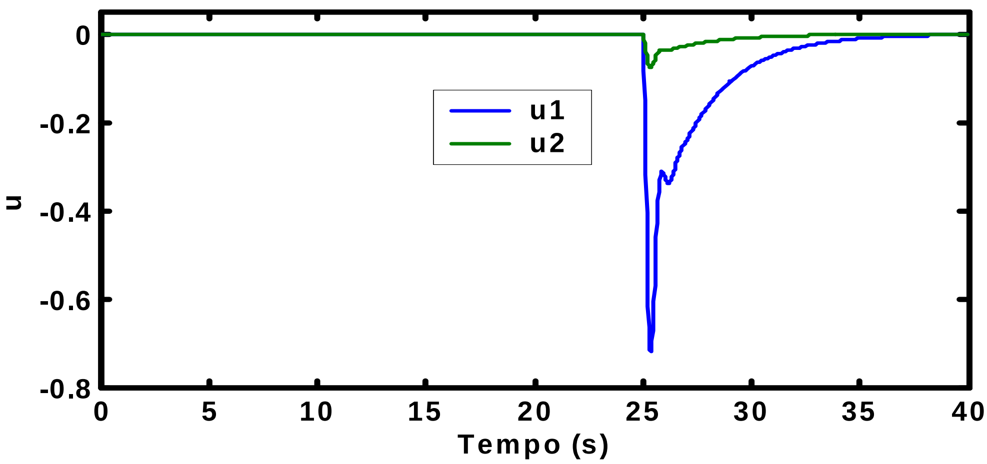
As saídas e o sinal de controle u2 apresentados na Figura D.12 satisfazem ao controle do processo. O sinal de controle u1 apresentou um esforço excessivo.

D.2.7 Problema regulador, com observador mínimo e com desvio planta/modelo:

A Figura D.13 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo em problema regulador, com observador de estado de ordem mínima e com desvio planta/modelo.



(a)



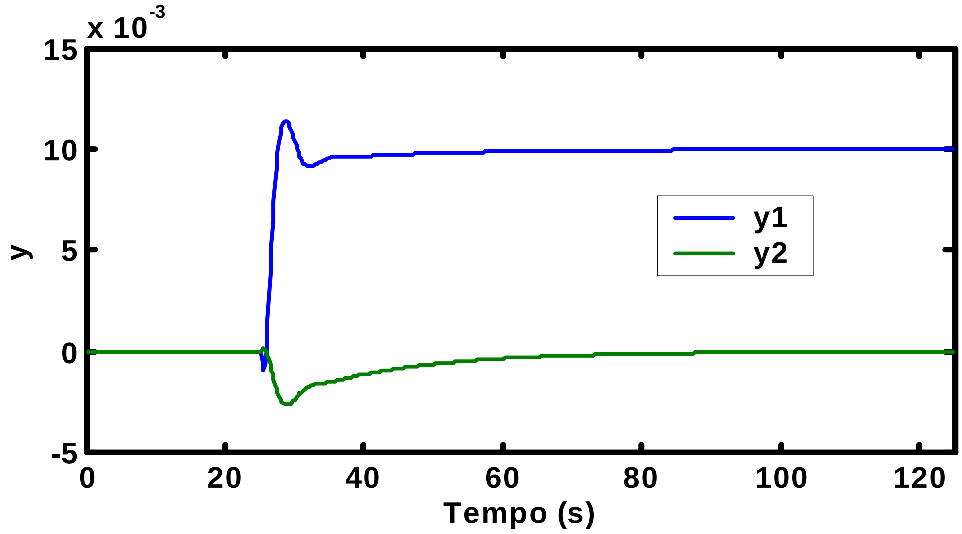
(b)

Figura D.13 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo.

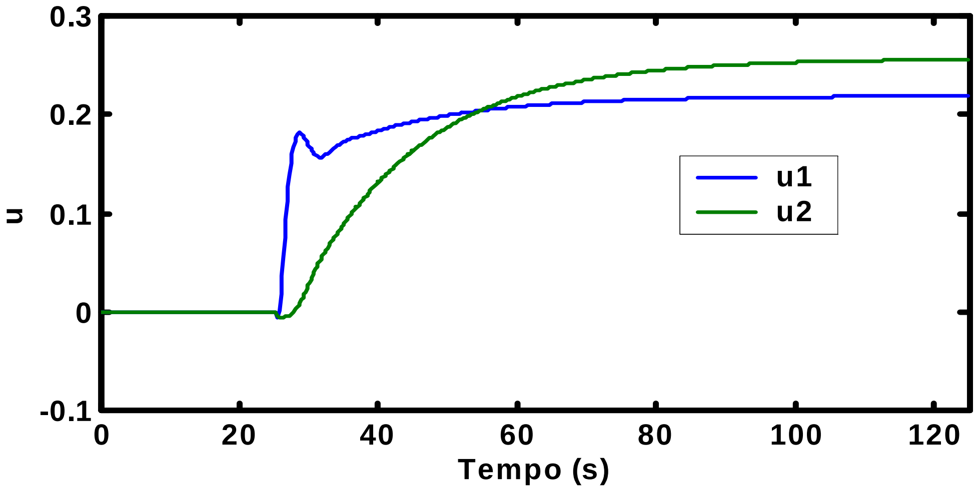
As saídas e o sinal de controle u2 apresentados na Figura D.13 satisfazem ao controle do processo. O sinal de controle u1 apresentou um esforço excessivo.

D.2.8 Problema servo, com observador mínimo e com desvio planta/modelo:

A Figura D.14 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle no tempo para problema servo, com observador de estado de ordem mínima e com desvio planta/modelo, aplicando-se degrau de 0,01 rad na referência do laço de velocidade. As Figuras D.15 e D.16 mostram os resultados para degrau de 0,01 pu na referência do laço de tensão e carga (**d**) de 0,01 pu no sistema respectivamente.



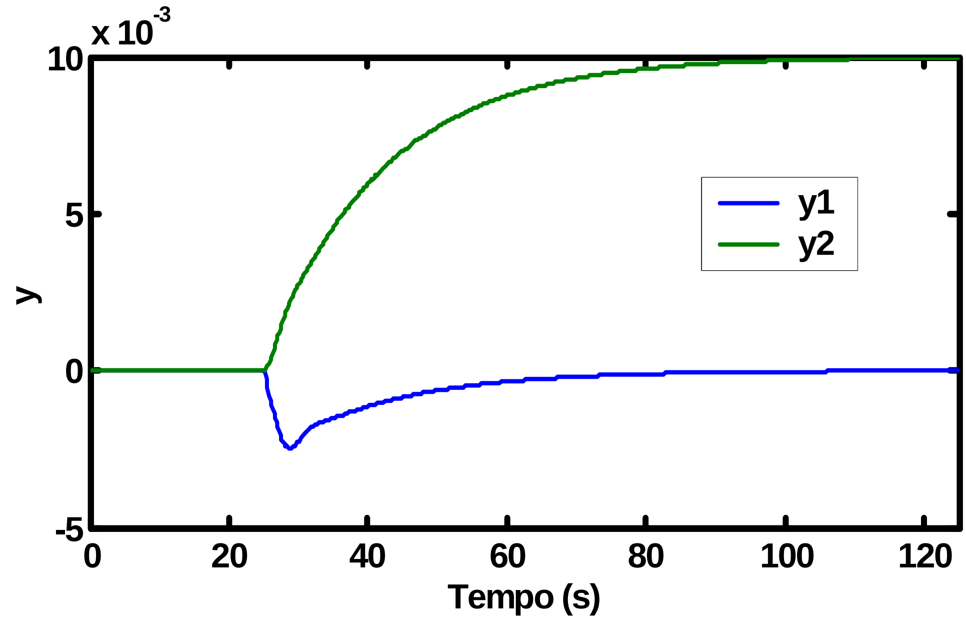
(a)



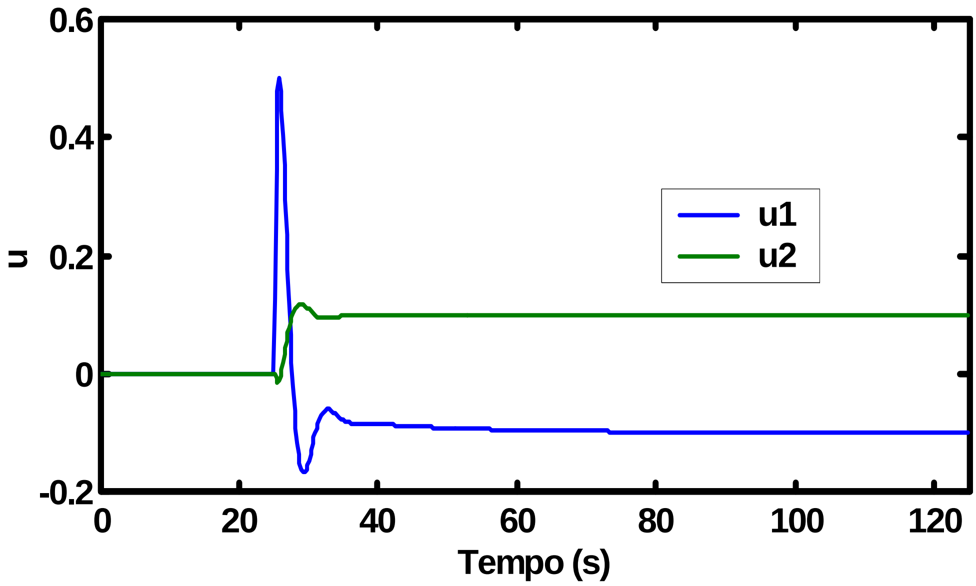
(b)

Figura D.14 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

As saídas apresentadas na Figura D.14 satisfazem ao controle do processo. Os sinais de controle apresentaram um esforço excessivo.



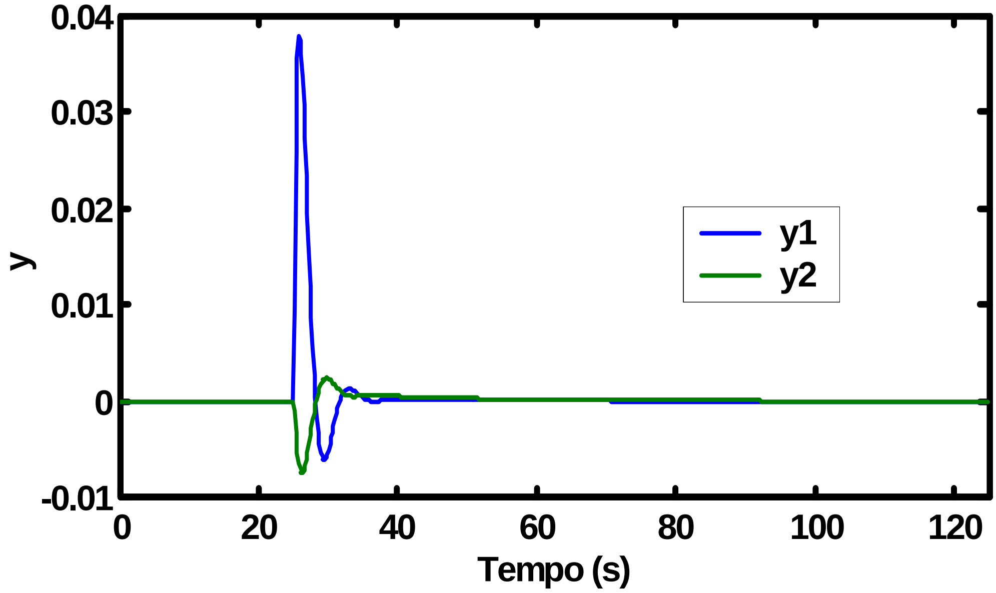
(a)



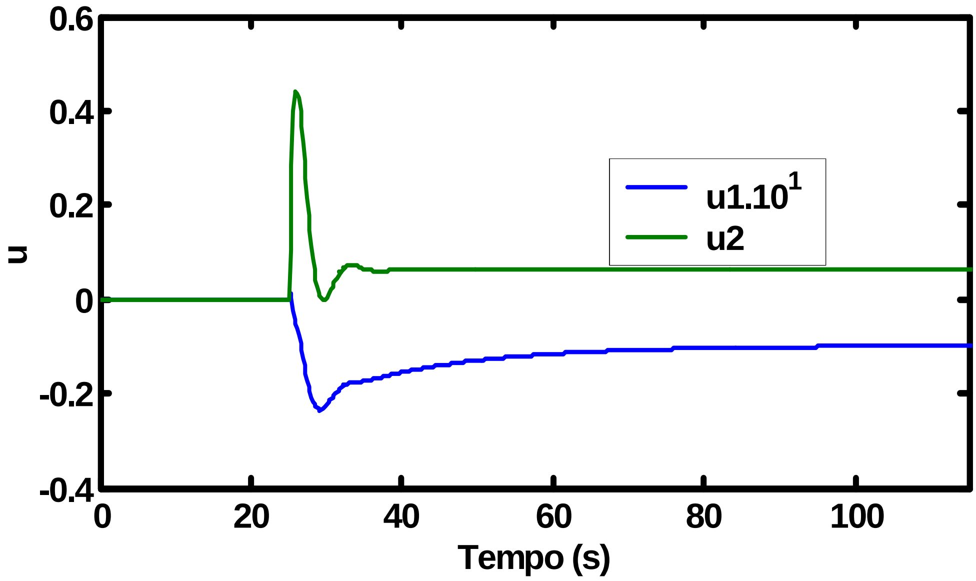
(b)

Figura D.15 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

As saídas apresentadas na Figura D.15 satisfazem ao controle do processo. Os sinais de controle apresentaram um esforço excessivo.



(a)



(b)

Figura D.16 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, com observador de ordem mínima, com desvio planta/modelo e controle ótimo. Carga de 0,01 pu.

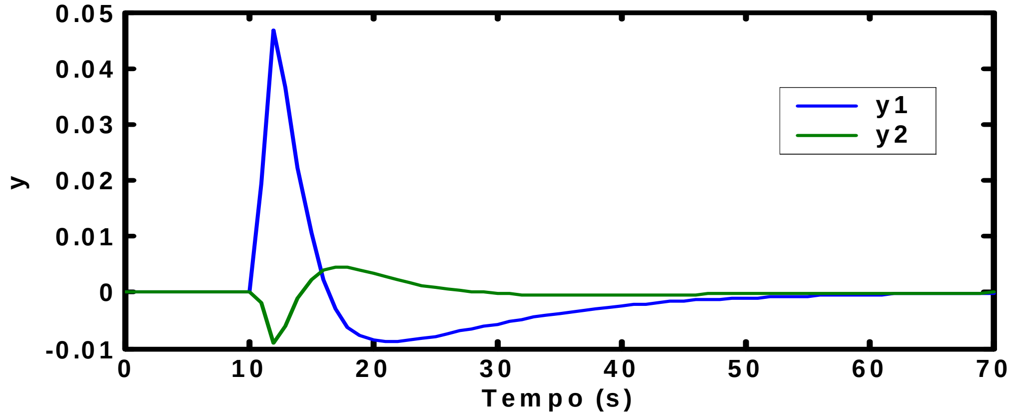
As saídas apresentadas na Figura D.16 satisfazem ao controle do processo. Os sinais de controle, apesar do pico, apresentaram valores razoáveis e atendem ao processo.

ANEXO E – GRÁFICOS DO CAPÍTULO 6

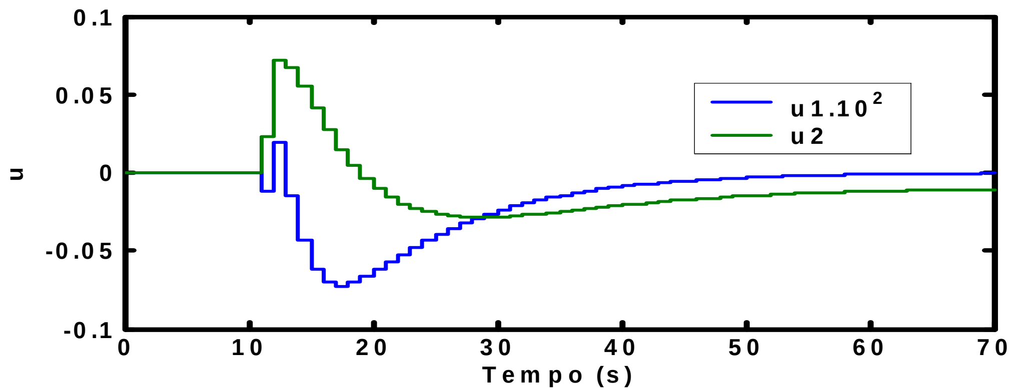
E.1 – Gráficos

E.1.1 Problema regulador,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC sem restrição:

A Figura E.1 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador pela entrada de carga, com modelagem perfeita, com observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



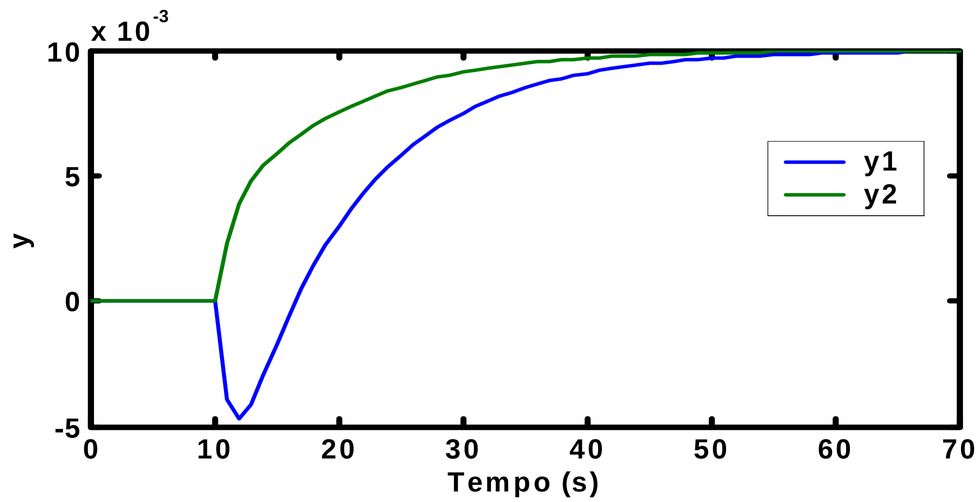
(b)

Figura E.1 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema regulador, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle.

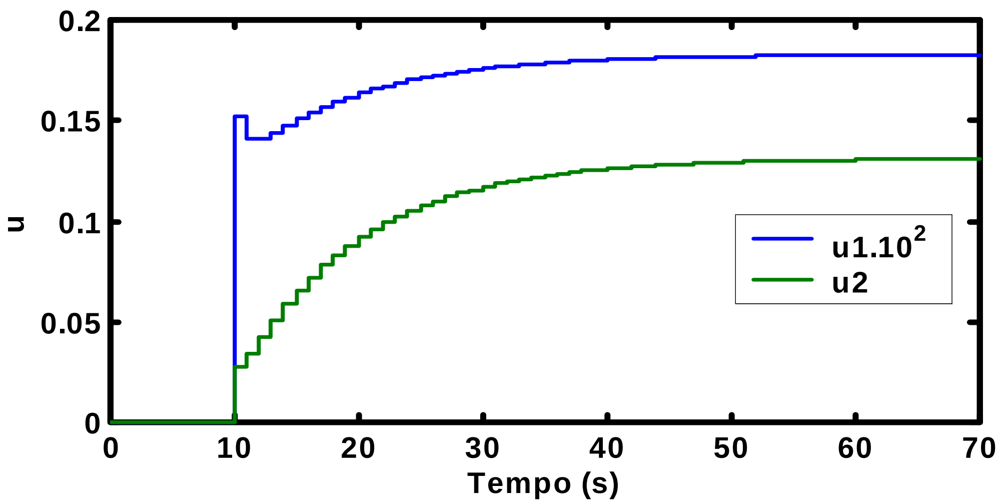
Na Figura E.1 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.2 Problema servo,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC sem restrição:

A Figura E.2 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema servo, com modelagem perfeita, com observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



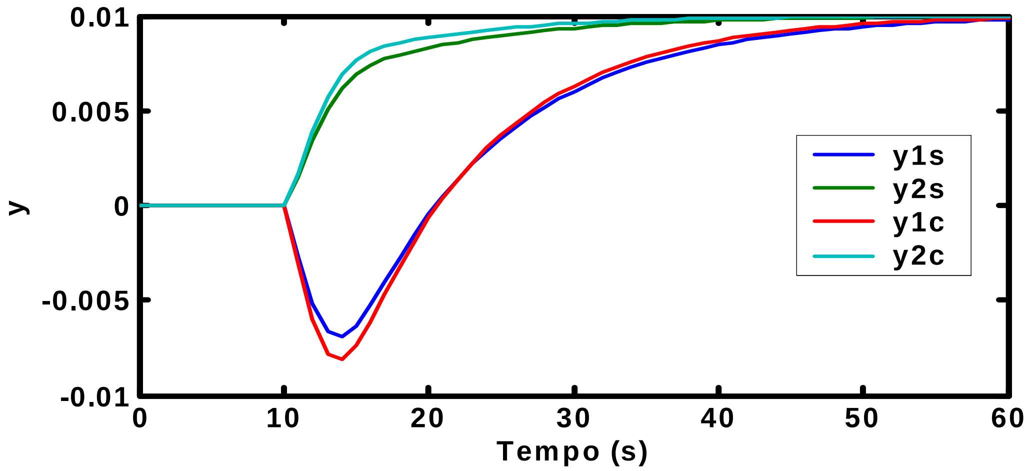
(b)

Figura E.2 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

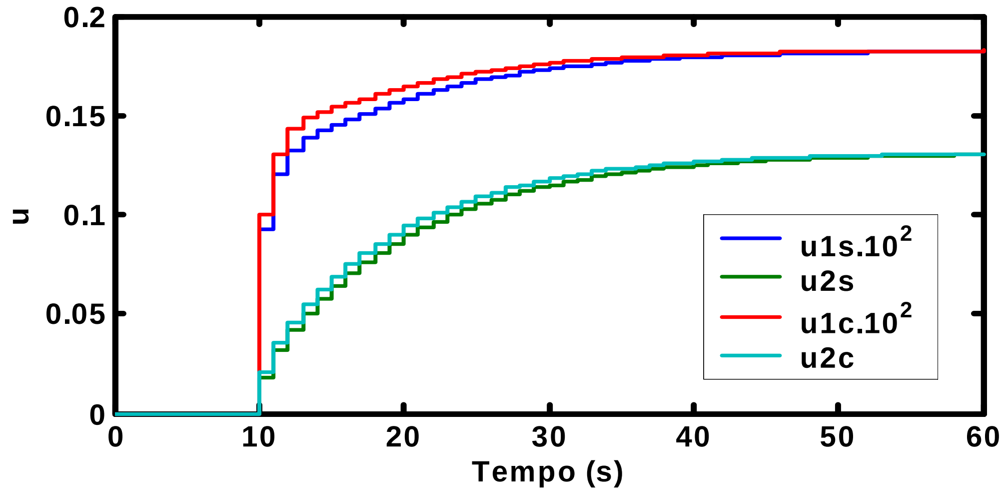
Na Figura E.2 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.3 Problema servo,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrição:

A Figura E.3 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema, servo com modelagem perfeita, com observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



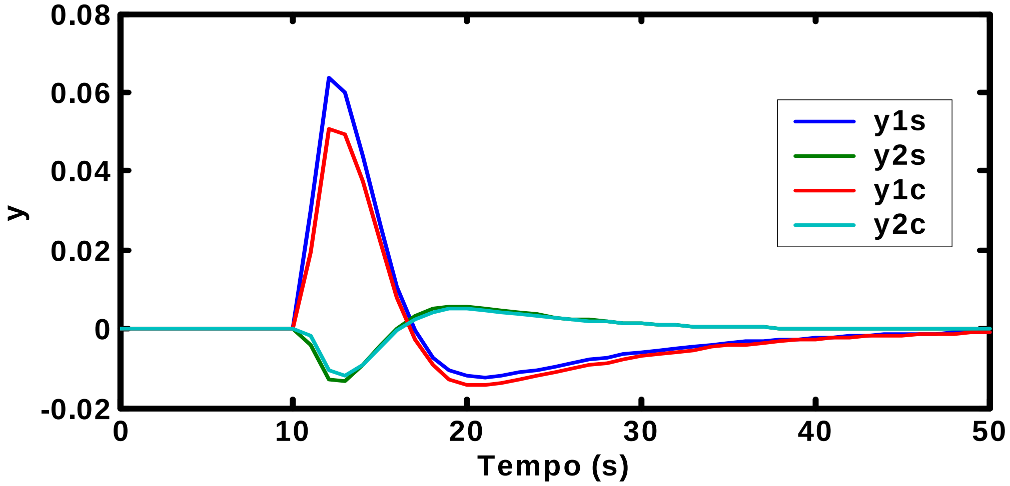
(b)

Figura E.3 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC com e sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

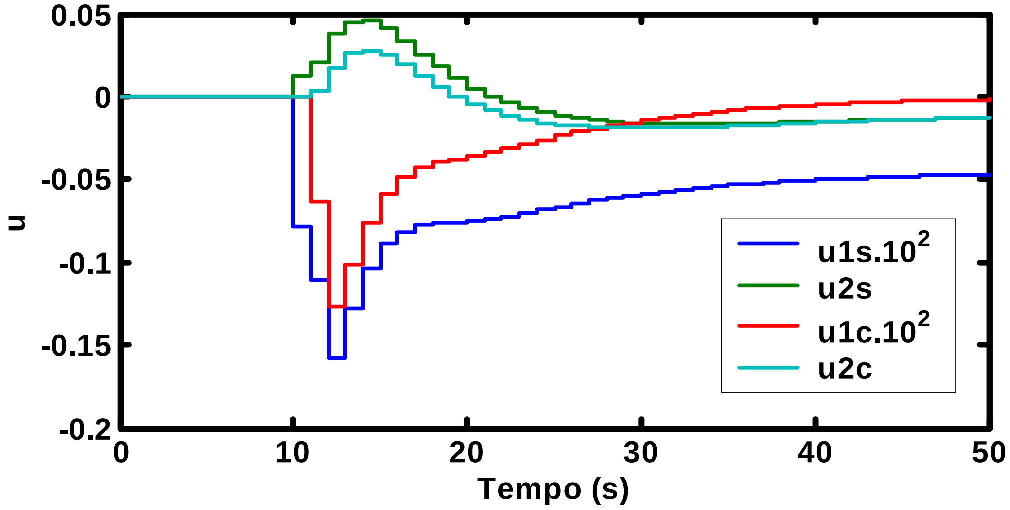
Na Figura E.3 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.4 Problema regulador,com observador pleno, com modelagem perfeita e MPC com e sem restrição:

A Figura E.4 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema, regulador considerando a entrada de carga, com modelagem perfeita, com observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



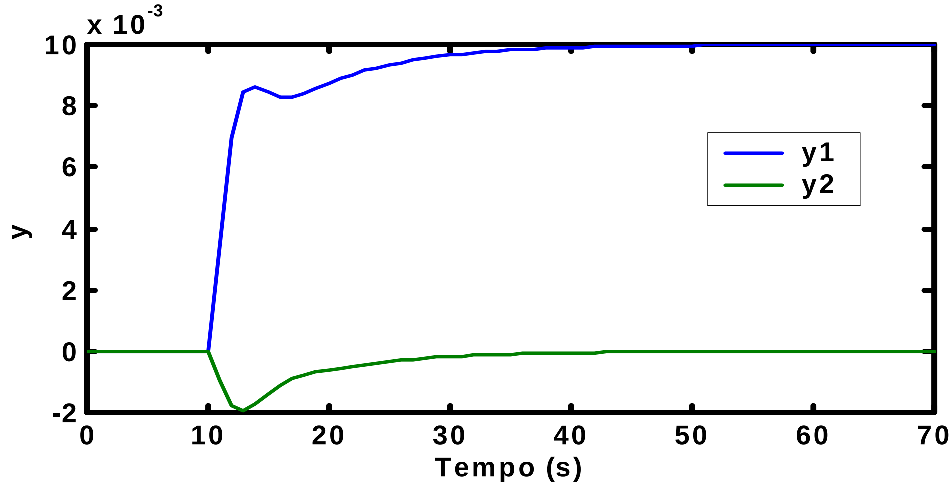
(b)

Figura E.4 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com modelagem perfeita e controle MPC com restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle.

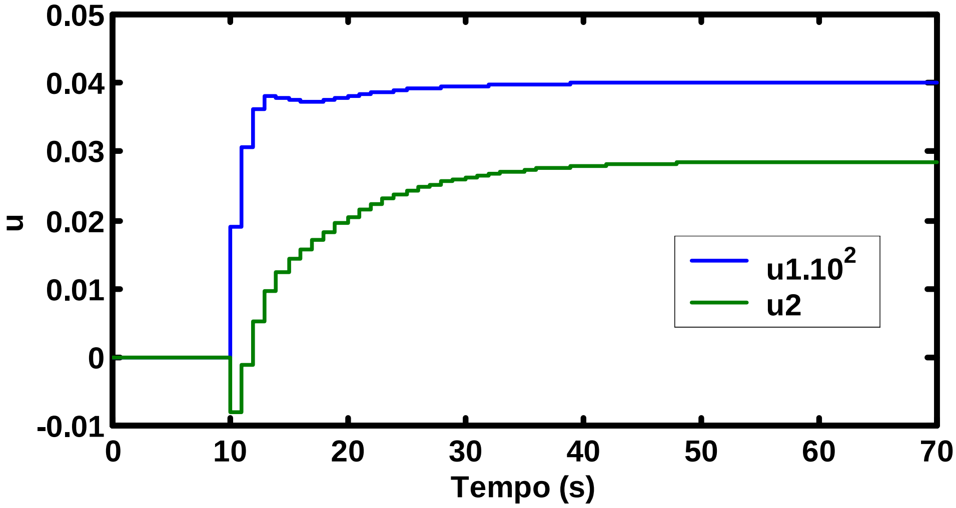
Na Figura E.4 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.

E.1.5 Problema servo, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição:

As Figuras E.5 e E.6 mostram as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema servo, com desvio planta/modelo, sem observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



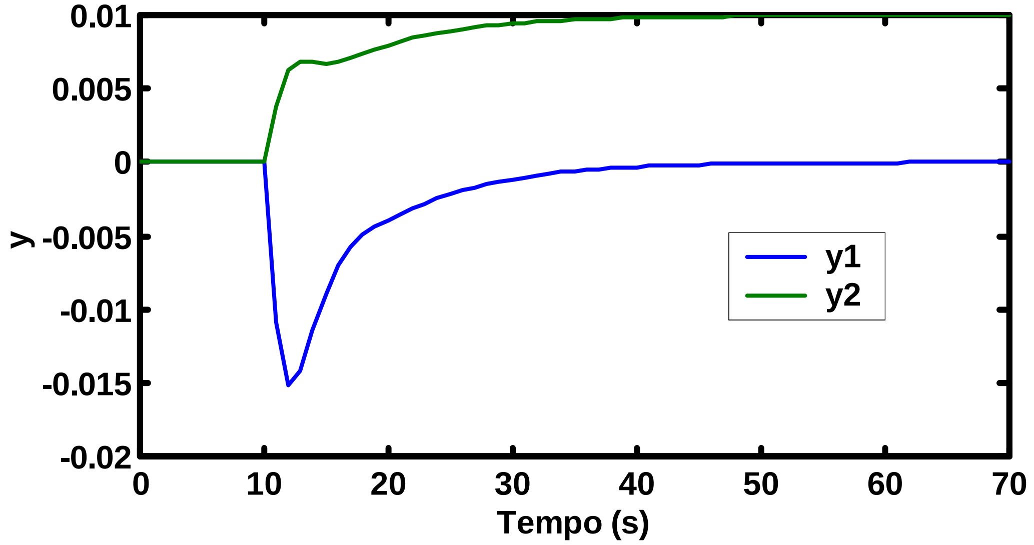
(a)



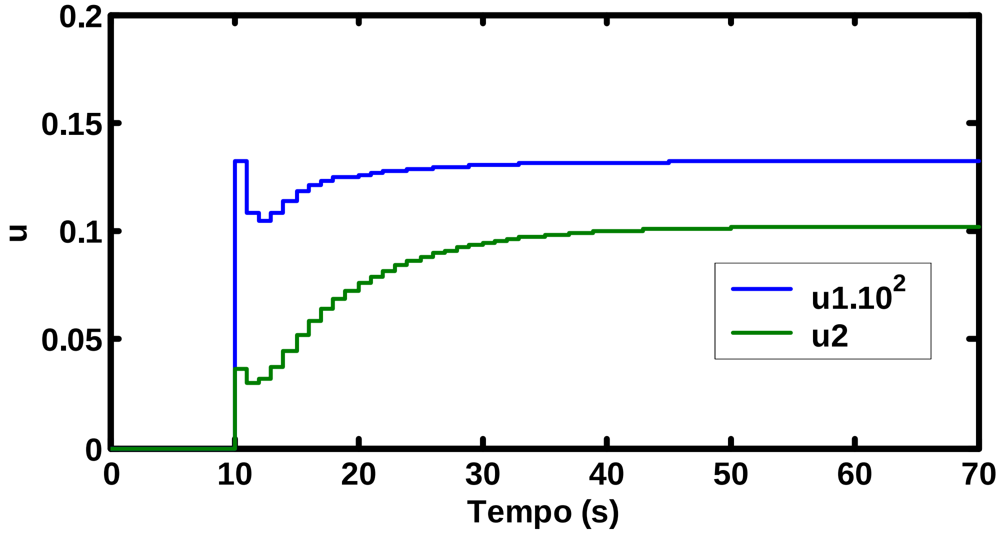
(b)

Figura E.5 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ.

Na Figura E.5 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.



(a)



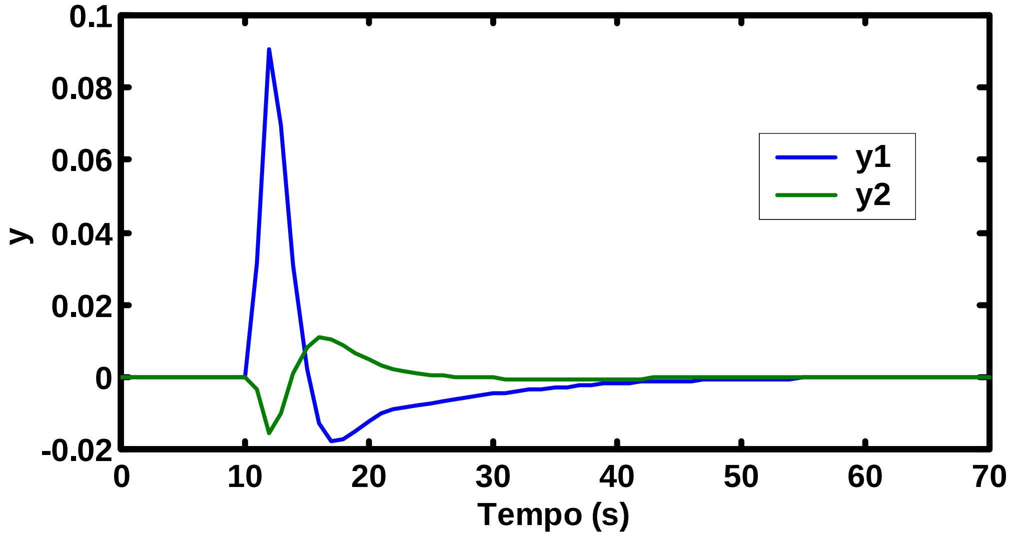
(b)

Figura E.6 – a) Curvas das saídas (**y**) e b) Curvas dos sinais de controle para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta ao degrau aplicado na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

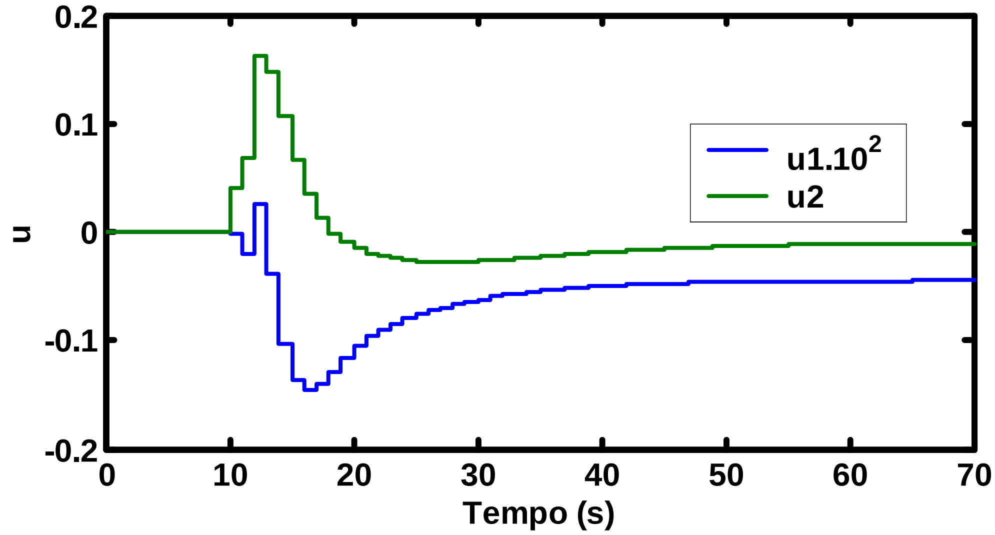
Na Figura E.6 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atendem ao processo.

E.1.6 Problema regulador, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição:

A Figura E.7 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador, com desvio planta/modelo, sem observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



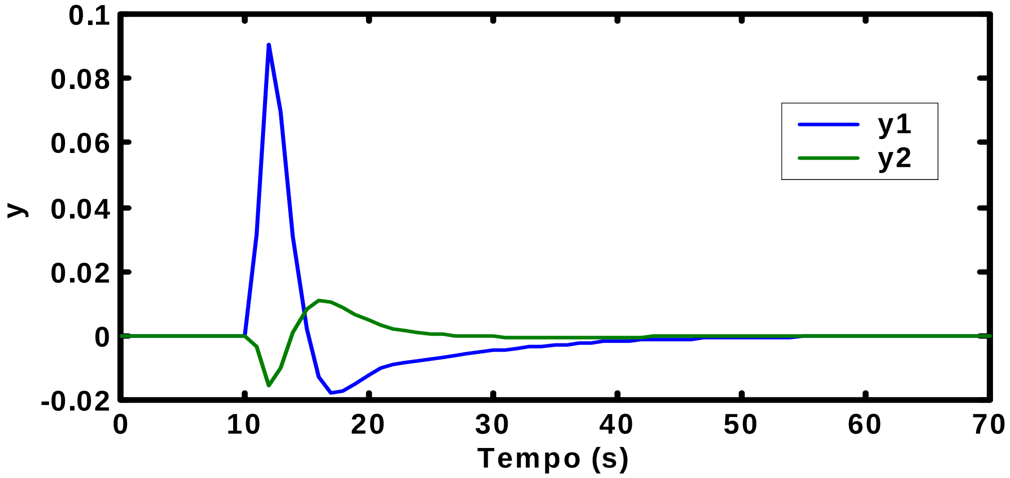
(b)

Figura E.7 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle.

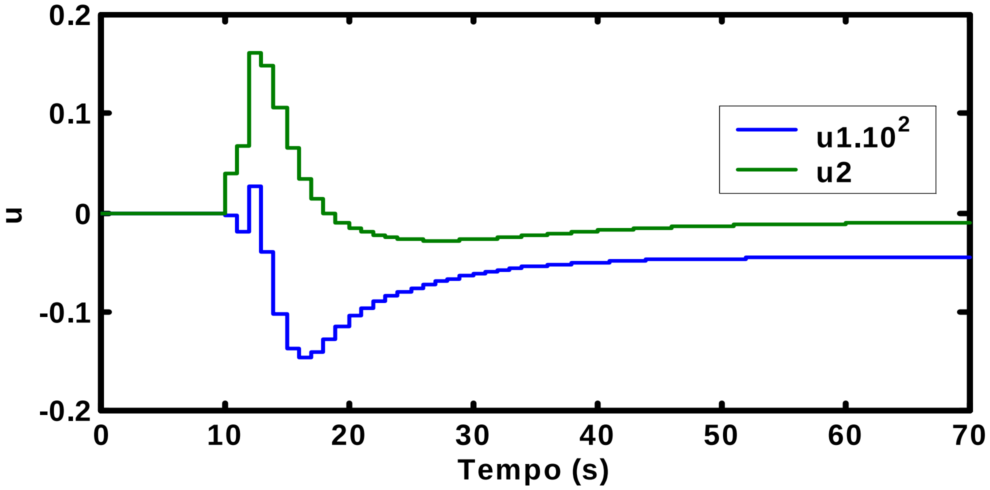
Na Figura E.7 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.7 Problema regulador, com observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição:

A Figura E.8 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador, com desvio planta/modelo, com observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



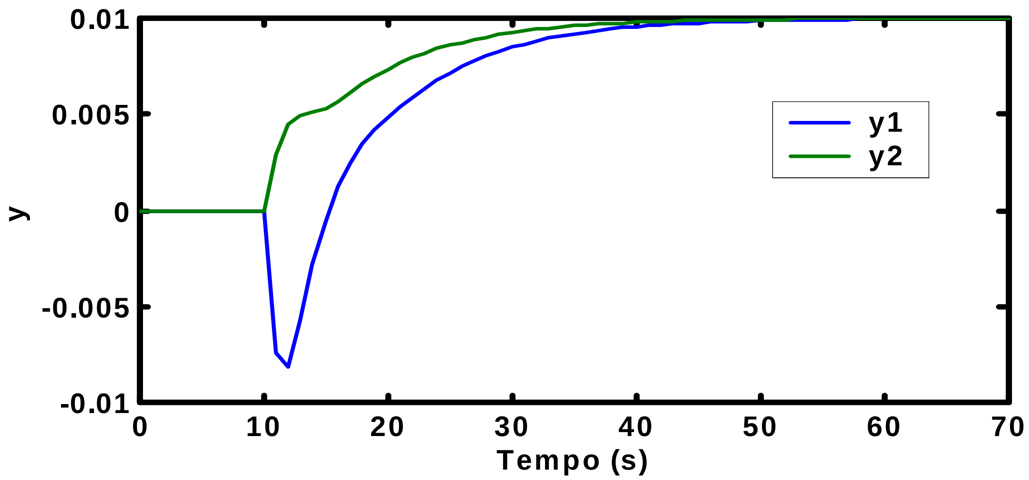
(b)

Figura E.8 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Degrau de 0,01 pu na carga e 0,01 pu de perturbações não medidas nos sinais de controle.

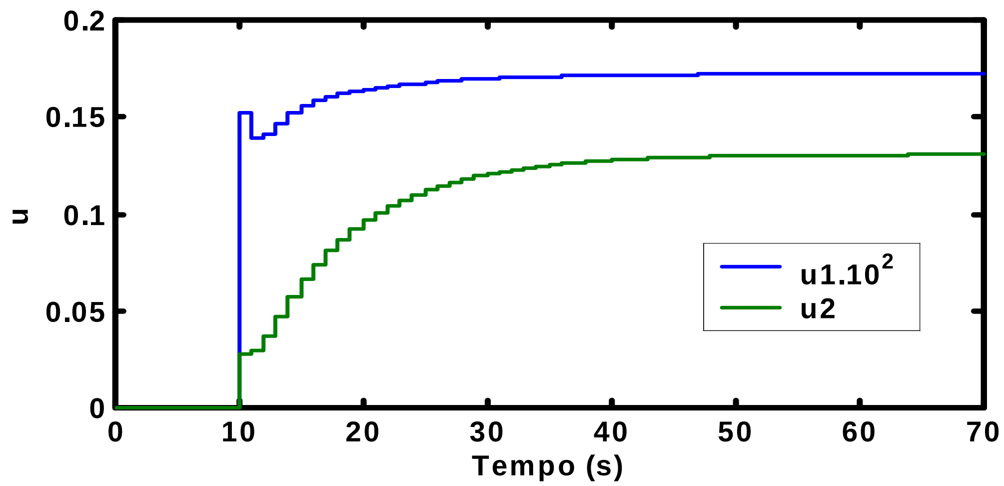
Na Figura E.8 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.8 Problema servo, com observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC sem restrição:

A Figura E.9 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema servo, com desvio planta/modelo, com observador de estado e com controlador MPC sem restrição.



(a)



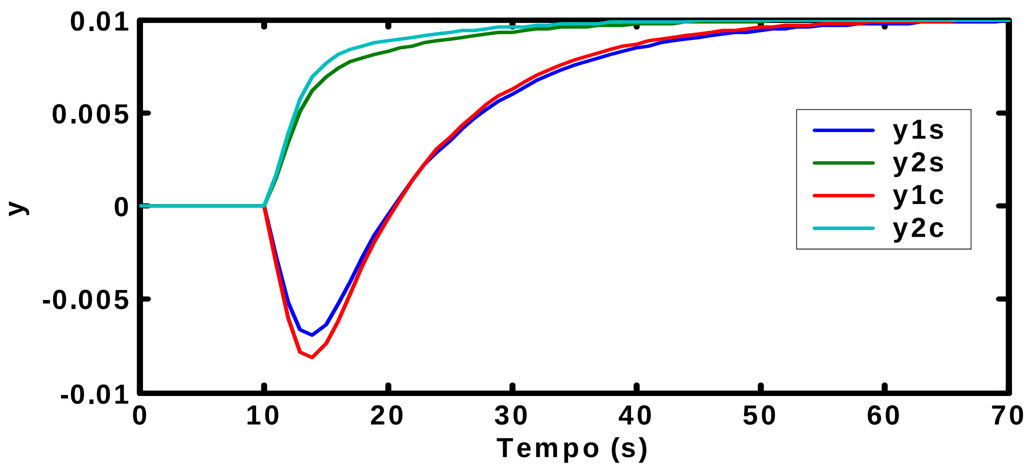
(b)

Figura E.9 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, com observador, com desvio planta/modelo e controle MPC sem restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

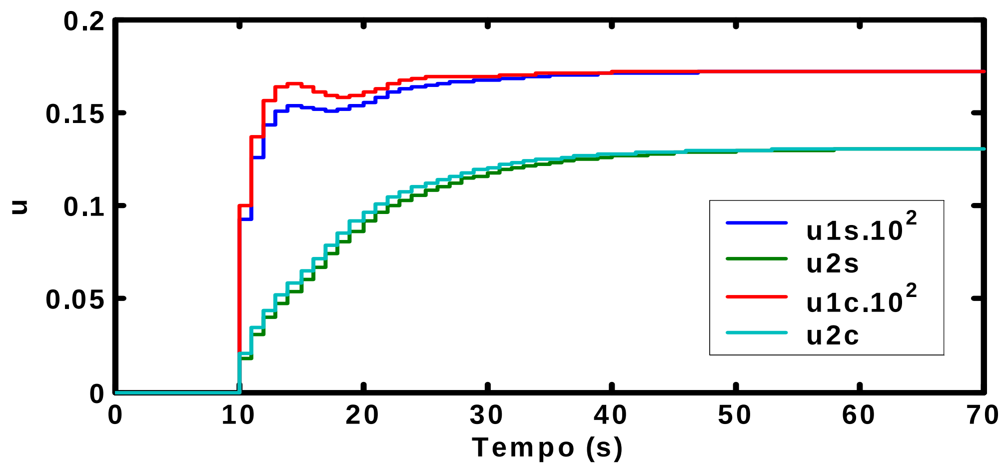
Na Figura E.9 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.9 Problema servo, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrição:

A Figura E.10 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema servo, com desvio planta/modelo, sem observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



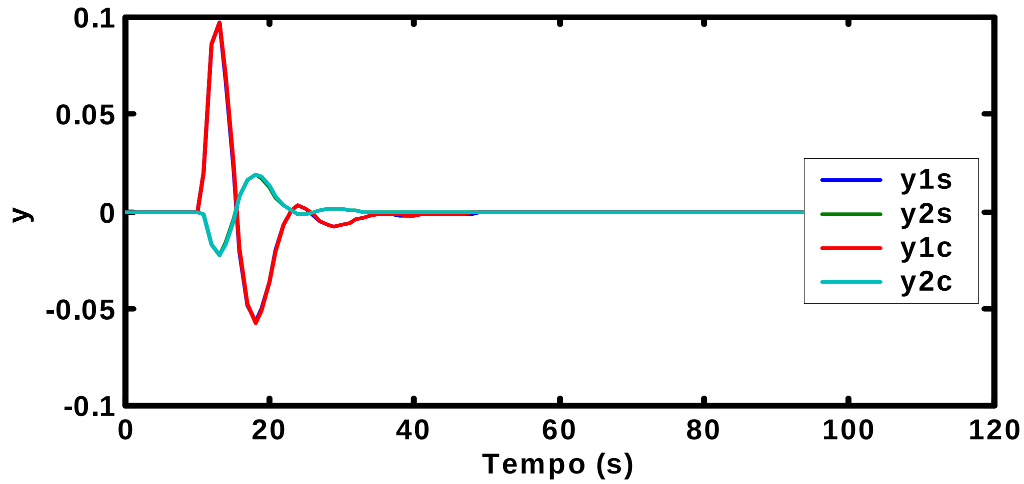
(b)

Figura E.10 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema servo, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Resposta aos degraus aplicados na referência do laço de velocidade referente à variação de 0,01 rad no ângulo δ e na referência do laço de tensão referente à variação de 0,01 pu na tensão VT.

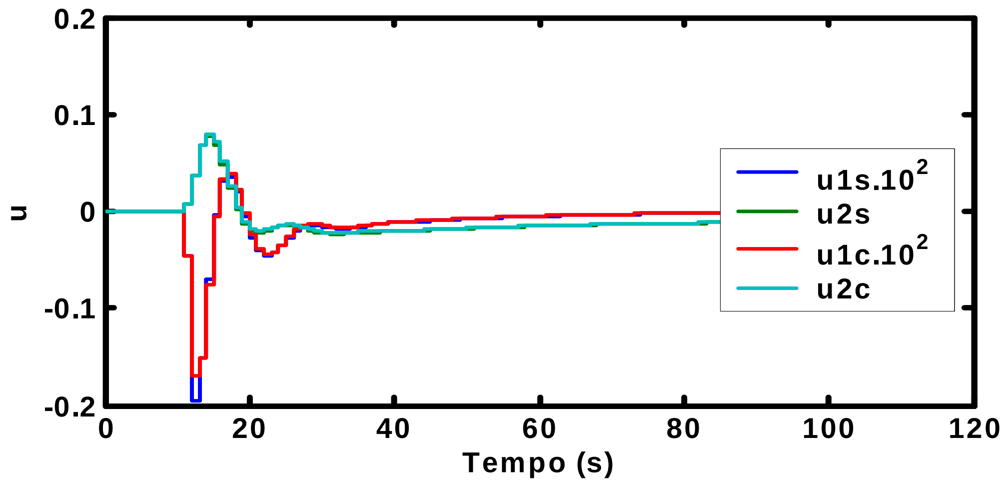
Na Figura E.10 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

E.1.10 Problema regulador, sem observador pleno, com desvio planta/modelo e MPC com e sem restrição:

A Figura E.11 mostra as curvas das saídas e dos sinais de controle para o problema regulador, com desvio planta/modelo, sem observador de estado e com controlador MPC com e sem restrição.



(a)



(b)

Figura E.11 – a) Curvas das saídas (**y**); b) Curvas dos sinais de controle, para problema regulador, sem observador, com desvio planta/modelo e controle MPC com restrição. Degraus de 0,01pu na carga e 0,01 de perturbação nos sinais de controle.

Na Figura E.11 pode-se observar que as saídas comportam-se como desejado e os sinais de controle apresentam valores razoáveis e que atende ao processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON,P. M. & FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*, Ames, Iowa, USA The Iowa State University Press, 1982.

AZZAM, M. *Robust Automatic Generation Control*, Energy Conversion & Management 40, p. 1413-1421, 1999.

BLONDEL, V. D ,TSITSIKLIS, J.N.(2000). *A Survey of Computational Complexity Results in Systems and Control*, Automatica 36, p. 1249-1274, 2000.

CENTRO DA MEMÓRIA DA ELETRICIDADE NO BRASIL. Panorama do Setor de Energia Elétrica no Brasil, Memória da Eletricidade, Rio de Janeiro, 1988.

D'AZZO, J. J. & HOUPIS,C.H. Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares, Editora Guanabara Dois SA, Rio de Janeiro, 1981.

DOYLE, F. J., OGUNNAIKE, B. A., PEARSON, R. K. *Nonlinear Model Based Control Using Second-order Volterra Models*, Automatica, Vol. 31, Nº 5, 1995, p. 697-714.

DOYLE, J. C. & Stein,G. *Multivariable Feedback Design: Concepts for Classical/Modern Synthesis*, IEEE Trans. Auto. Control, 1981, AC-26, 4, 1981.

EATON, J. W., RAWLINGS, J. B. *Model Predictive Control of Chemical Process*, Proceeding of American Control Conference, ACC, p. 1790-1795, 1991.

ELGERD, O. L. Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1976.

FASOL, K., H. *Stabilization and Re-engineering of a Hydro-elétric Power Plan – a Case Study*, Control Engineering Practice, Vol. 5, nº1, p. 109-115, 1997.

FRANKLIN, G. F., & POWELL J.D. *Digital Control of Dynamic Systems*, Reading, Mass: Addison-Wesley Publishing Co, 1980.

FURUTA, K., SANO, A., ATHERTON, D. *State Variable Methods in Automatic Control*, John Wiley & Sons, Tokyo, 1988.

GARCIA,C. E., PRETT, D. M., MORARI,M. *Model Predictive Control: Theory and Practice – a Survey*, Automatica, Vol. 25, Nº 3, p. 335-348, 1989.

GARCIA,C.E. & MORSHEDI, A. M. *Quadratic Programming Solution of Dynamic Matrix Control* (QDMC), Chem. Eng. Commun.,Vol. 46, p. 73-87, 1982.

GATTU,G. & ZAFIRIOU, E. *Nonlinear Quadratic Dynamic Matrix control with State Estimator*, Ind. Eng. Chem. Res. Vol 31, Nº 4, p. 1096-1104, 1992.

GOMES, L. R. Equacionamento Básico para Modelagem de Sistemas de Excitação de Máquinas Síncronas que empregam Grupos de Excitatrizes Rotativas, 1º Seminário de Operação e Manutenção, CEMIG, 1999.

GOMES, L. R. Regulação de Velocidade de Turbinas Hidráulicas, 11.000-MN/PD3-0.030E/1985, CEMIG, 1985.

GOMES, L. R. Aplicação da Teoria do Controle Ótimo via Realimentação de Estado – Dissertação Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI Julho de 1987.

GOMES,L R. Manutenção Geral nos Sistemas de Excitação – Máquina 03 e 04 da Usina dos Martins, 01.124-PD/PR3-096/92, CEMIG, 1992 a.

GOMES,L R. Manutenção Geral nos Sistemas de Regulação de Velocidade – Máquina 03 e 04 da Usina dos Martins, 01.124-PD/PR3-097/92, CEMIG, 1992 b.

HENRIQUE, H. M. Uma Contribuição ao Estudo de Redes Neuronais Aplicadas ao Controle de Processos, COPPE/UFRJ , Tese de Doutorado, 1999.

HENSON, M.A. & SEBORG, D. A. *Nonlinear Process Control*, Prentice-Hall, New Jersey, 1997.

HIMMELBLAU, D. M. & HOSKINS, J.C. *Artificial Neural Network Models of Knowledge Representation in Chemical Engineering, Comput*. Chem. Eng., Vol 12, nº 9/10, p. 881-890, 1988.

HUANG, B. & SHAH, S. L. *Practical issues in multivariable feedback control performance assessment*. J. Proc. Cont., vol 8, nºs 5 e 6, p. 421-430, 1998.

KAWAI, K., TAKIZAWA, Y., WATANABE, S. *Advanced Automation for Power-Generation Plants – past, present and future*, Control Engineering Practice 7, p.1405 e1411, 1999.

KAVSEK-BIASIZZO, K., SKRJANC, I., MATKO D. *Fuzzy predictive Control of Highly Nonlinear pH Process*, Computers Chem. Eng., Vol. 21, suppl., p. S613-S618, 1997.

KIMBARK, E. W. *Synchronous Machine*, Dover Publications, Inc., New York, 1956.

LEE, J. ,CHIHHULA, Y. YU, Z. KANTOR,J. C. *Improving Computational Efficiency of Model Predictive Control Algorithm using wavelet transformation*, INT. J. Cont. Vol. 61, Nº 4, pp 859-883, 1995.

LEE, J. H. & RICKER,N. L. *Extended Kalman Filter Based Nonlinear Model Predictive Control*, Ind. Eng. Chem. Res., 33,pp 1530-1541, 1994.

LIU, G. P., KADIRKAMANATHAN, V., BILLINGS, S. A. *Predictive Control for Non-linear Systems Using Neural Networks*, Int. J. Control, Vol. 71, Nº 6, p. 1119-1132, 1998.

MELLO, F. P. Dinâmica de Controle da Geração, 2ª Ed., Santa Maria, Edições UFSM, 1983.

MORARI, M. *Integrated plant control. A solution at hand or research topic for next decade*. Proceedings Chemical Process Control II, edit by Seborg and Edgar, p. 467, 1981

MUSKE, K. R. & RAWLINGS J. B. *Model Predictive Control with Linear Models*, AIChE J., Vol. 39, Nº 2, p. 262-287, 1993 a.

MUSKE, K. R. & RAWLINGS J. B. *Linear Model Predictive Control of Unstable Processes*, J. Process Control, Vol. 3, Nº 2, p. 85-96, 1993 b.

NANAYAKKARA, N., NAKAMURA, M., HATAZAKI, H. *Predictive Control of Wind turbines in Small Power Systems at High Turbulent Wind Speeds*, Control Engineering Practice, Vol. 5, nº 8, pp. 1063-1069, 1997.

OGATA, K. *Discrete-Time Control Systems*, Prentice-Hall, 2nd ed, 1987.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno, 2º Ed., Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, 1993.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Manual de Procedimentos da Operação – MPO, 1999.

RAY, W. H. *Multivariable Process Control – A Survey*, Computers and Chemical Engineering, Vol. 7, nº 4, p. 367-394, 1983

RICKER, N. L. *Model Predictive Control with State Estimation*, Ind. Eng. Chem. Res., 29, p. 374-382, 1990.

SARGENT, R. W. H. *Optimal Control*, Journal of Computational and Applied Mathematics 124, p. 361-371, 2000.

SEBORG, D. E. *A perspective on advanced strategies for process control*, Modeling identification and control, 1994, vol. 15, nº 3, p.179-189, 1994.

SEBORG, D. E, SHAH, S.L., EDGAR, T. F. *Adaptative Control Strategies for Process Control: A Survey*, AIChE J., 32, p. 881-913 , 1986.

SOUZA, Z., FUCHS, R. D., SANTOS, A. H. M. Centrais Hidro e Termelétricas, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1983.

STEPHANOPOULOS, G. *Chemical process control: an introduction to theory and practice*, New Jersey, Prentice-Hall, 1984.

SWIDENBANK, E., BROWN, M. D., FLYNN, D. *Self-tunning Turbine Generator Control for Power Plant*, Mechatronics 9, p. 513-537, 1999.

SYRMOS, V. L., ABDALLAH,C.T., DORATO P. AND GRIGORIADIS, K. *Static Output Feedback – A Survey*, Automatica, Vol. 33, nº 2, p. 125-137, 1997.

TRIPATHY, S. C. *Digital Governor for Use in Computer Control of a Generating Unit*, Energy Conversion & Management, Vol. 39, nº 10, p. 973-983, 1998.

WANG, H. F., SWIFT, F. J., HAO,Y. S., HOGG B. W. *Adaptative Stabilization of Power Systems by Governor-turbine Control*, Electrical Power & Energy systems, Vol. 18, nº 2, p. 131-138, 1996.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MODELAGEM E APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE MODERNO A SISTEMAS REGULADORES DE VELOCIDADE E TENSÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS.

Uberlândia

2002